

## Lucrarea 16 - SOLICITAREA CU IMPULS DE TENSIUNE A IZOLAȚIEI INTERNE A TRANSFORMATOARELOR

### 1. Noțiuni 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 cu front rapid în înfășurările transformatorului, are ca urmare un proces tranzitoriu complex, în cadrul căruia apar oscilații de tensiune, ale căror 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 figura 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).

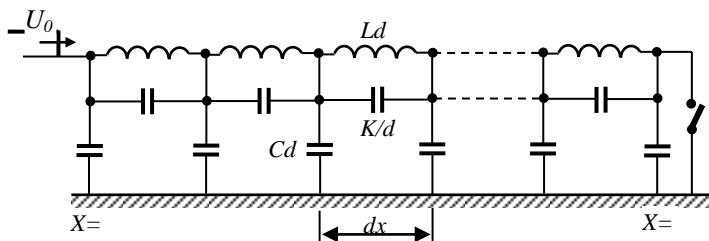


Fig. 1 – Schema echivalentă simplificată a unei bobine de transformator

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  $t$ , relații diferite în funcție de modul de tratare a sfârșitului înfășurării. Aceste expresii sunt prezentate mai jos:

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

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

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

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

$$u(x,0) = U_0 \frac{sh\alpha \cdot (l-x)}{sh\alpha \cdot l}, \quad u(x,\infty) = U_0 \left( 1 - \frac{x}{l} \right), \quad (3)$$

$$\text{în care: } \alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}. \quad (4)$$

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

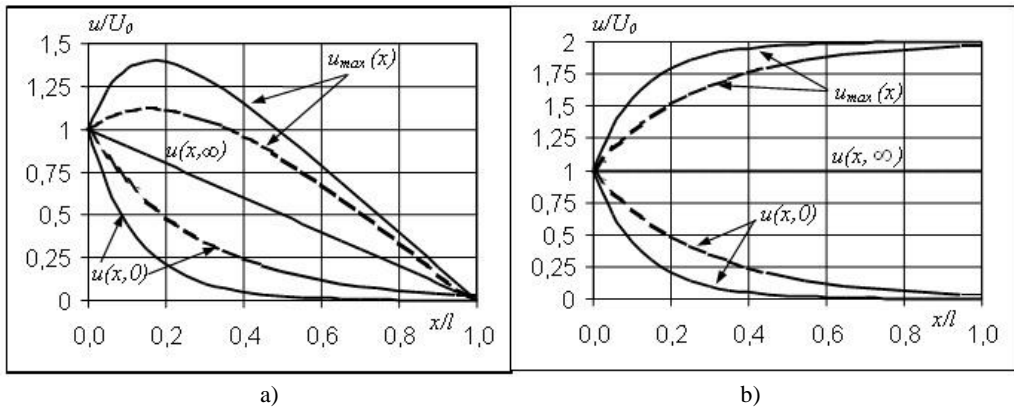
$$u(x,t) = U_0 \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{2l} \cos \Omega_n t \right], \quad (5)$$

$$\text{unde: } B_n = \frac{4}{n\pi \left[ 1 + \frac{K}{C} \left( \frac{n\pi}{2l} \right)^2 \right]}; \quad \Omega_n = \frac{n\pi}{2l \sqrt{LC \left[ 1 + \frac{K}{C} \left( \frac{n\pi}{2l} \right)^2 \right]}}, \quad n = 1,3,5,\dots \quad (6)$$

Repartițiile inițială și finală sunt date de relațiile:

$$u(x,0) = \frac{ch\alpha \cdot (l-x)}{ch\alpha l}, \quad u(x,\infty) = U_0. \quad (7)$$

În figura 2 sunt redate grafic formele repartițiilor tensiunii de impuls, pentru cele două moduri de tratare ale sfârșitului înfășurării. De asemenea, sunt date valorile maxime ale oscilațiilor din timpul regimului tranzitoriu de-a lungul înfășurării,  $U_{max}(x)$ .



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

Din examinarea acestor grafice rezultă următoarele concluzii cu privire la solicitarea izolației înfășurărilor:

- *solicitarea izolației longitudinale* (între spire) este proporțională cu panta repartiției tensiunii de-a lungul înfășurării,  $dU/dx$ . Dintre toate curbele din figura 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  $\alpha$ , 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. Figura 2 arată că valorile cele mai mari ale tensiunii nu apar la momentele inițial și final ale regimului tranzitoriu ci între acestea, fiind datorate 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  $\alpha$  contribuie și la reducerea solicitării izolației transversale;
- pentru reducerea solicitărilor izolației înfășurării datorate tensiunii de impuls, se pot aplica metode constructive în vederea micșorării valorii factorului  $\alpha$ , cele mai folosite fiind folosirea inelului de gardă sau a înfășurărilor întretesute.

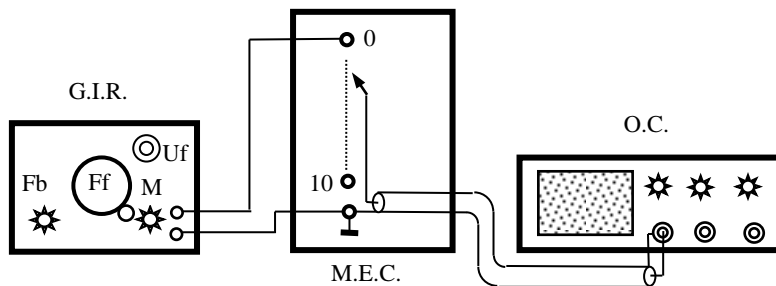
## 2. Determinări experimentale

Lucrarea de laborator are ca obiectiv analiza modului în care are loc repartiția tensiunii de impuls pe o înfășurare de transformator, folosind modelul electromagnetic combinat al unei faze de transformator cu două înfășurări. În acest scop, mai întâi, vor fi prezentate echipamentele utilizate pentru realizarea montajului experimental, modul de lucru fiind prezentat ulterior.

### 2.1. Prezentarea echipamentelor din montajul experimental

Pentru determinarea repartiției tensiunii de impuls pe o înfășurare de transformator se va realiza montajul experimental prezentat în figura 3, 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. 3** – Schema montajului experimental utilizat pentru analiza repartiției tensiunii pe o înfășurare de transformator.

#### a) Modelul electromagnetic combinat al transformatorului

Modelarea geometrică, prin reducerea la scară a dimensiunilor reale, a unei înfășurări de transformator prezintă o serie de dezavantaje, cum ar fi: necesitatea folosirii unei scări de modelare subunitare și pentru timp, respectiv reducerea duratelor frontului și semi-amplitudinii unde de tensiune, micșorarea rezistivității conductorului de bobinaj și altele.

Aceste neajunsuri sunt evitate prin folosirea *modelului electromagnetic combinat* care este format din două părți: un model geometric al înfășurării transformatorului, respectiv 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 figura 1 și care sunt prezentate în tabelul 1. Pentru eliminarea dezavantajelor modelului geometric este potrivit a se adopta  $p_l = 1$ , iar pentru păstrarea pe model a aceluiași număr de spire de pe original,  $p_w = 1$ .

**Tabelul 1.** Factorii de similitudine ai modelului electromagnetic combinat

Mărimea	Simbol	Relații de similitudine	Relații între factorii de similitudine	
			rezultate	adoptate
Lungime	$l$	$l_m = p_l l_0$	$\frac{p_L p_C}{p_l^2} = 1$ $p_L = p_l p_w^2$ $p_u = \frac{p_w p_l^2}{p_l}$ $p_i = \frac{p_l}{p_w} \quad p_R = \frac{p_l p_w^2}{p_l}$	$p_l$
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	$R$	$R_m = p_R R_0$		$p_l$

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;
- 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;
- 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 figura 4 este prezentată schema electrică a transformatorului, așa cum apare și pe placa frontală a modelului din laborator.

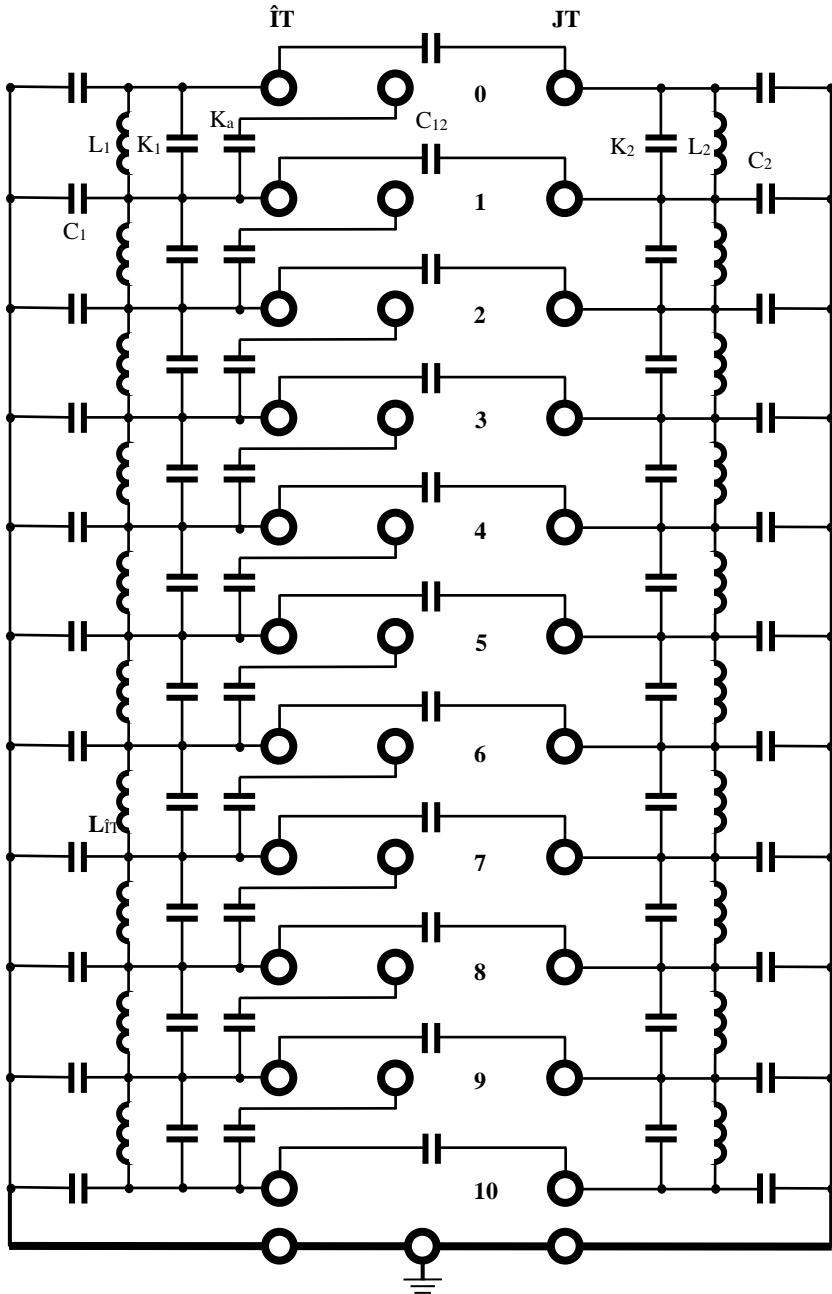


Fig. 4 – Schema electrică a modelului electromagnetic combinat pentru o fază a transformatorului cu două înfășurări

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 întretesute sunt prevăzute capacitățile adiționale  $K_a$ , care vor putea fi conectate în paralel cu capacitățile longitudinale  $K_1$  ale înfășurării de înaltă tensiune.

*b) Generatorul de impulsuri repetate și osciloscopul catodic*

Drept sursă a impulsului de tensiune se va folosi un generator de impulsuri repetate, model E 0501, o imagine a dispozitivului aflat în dotarea laboratorului fiind prezentată în figura 5. Alături de aceasta, este prezentat și un detaliu grafic cu osciloscopul Hameg HMG 303-6 folosit.



**Fig. 5** – Generatorul de impulsuri repetate și osciloscopul Hameg HMG 303-6 utilizate pentru realizarea montajului experimental

Conform notațiilor din figura 3, generatorul de impulsuri permite următoarele reglaje:  $F_b$ -reglarea frecvenței în trepte;  $F_f$ -reglarea continuă a frecvenței;  $U_f$ -reglarea tensiunii de ieșire;  $M$  – forma tensiunii la ieșire.

Ambele dispozitive au fost utilizate anterior, în cadrul *Lucrării 11 - Studiul propagării undelor de impuls pe linii electrice cu ajutorul modelelor fizice.*

**2.2. Modul de lucru**

Determinarea modului în care este solicitată izolația transformatorului se va realiza pentru următoarele cazuri:

- înfășurare normală cu sfârșitul legat la pământ;
- înfășurare întretesută cu sfârșitul legat la pământ;
- înfășurare normală cu sfârșitul izolat;
- înfășurare întretesută cu sfârșitul izolat.

În acest scop se vor parcurge următorii pași:

- se va realiza montajul indicat în figura 3, ce va fi particularizat pentru cele patru cazuri ce urmează a fi analizate;
- 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 indicațiilor din figura 6.

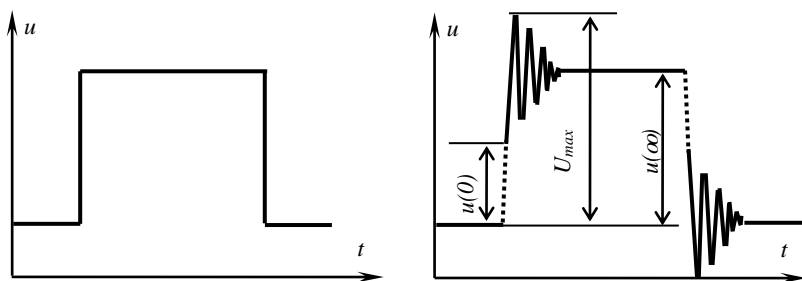


Fig. 6 – Formele impulsului de tensiune la începutul înfășurării și la după prima secțiune

- 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  $K$ ;
- rezultatele obținute vor fi trecute în niște tabele centralizatoare, realizate conform modelelor prezentate în tabelele 2 ÷ 5.

**Tabelul 2.** Rezultatele măsurătorilor pentru cazul transformatorului cu înfășurare normală al cărei sfârșit este legat la pământ

Borna		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x/l$												
$u(0)$	$u(0)/U_0$											
$u(\infty)$	$u(\infty)/U_0$											
$U_{max}$	$U_{max}/U_0$											



**Tabelul 3.** Rezultatele măsurătorilor pentru cazul transformatorului cu înfășurare întrețesută al cărei sfârșit este legat la pământ

<b>Borna</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$x/l$												
$u(0)$	$u(0)/U_0$											
$u(\infty)$	$u(\infty)/U_0$											
$U_{max}$	$U_{max}/U_0$											

**Tabelul 4.** Rezultatele măsurătorilor pentru cazul transformatorului cu înfășurare normală al cărei sfârșit este izolat

<b>Borna</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$x/l$												
$u(0)$	$u(0)/U_0$											
$u(\infty)$	$u(\infty)/U_0$											
$U_{max}$	$U_{max}/U_0$											

**Tabelul 5.** Rezultatele măsurătorilor pentru cazul transformatorului cu înfășurare întrețesută al cărei sfârșit este izolat

<b>Borna</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
$x/l$												
$u(0)$	$u(0)/U_0$											
$u(\infty)$	$u(\infty)/U_0$											
$U_{max}$	$U_{max}/U_0$											

Se vor reprezenta grafic, în unități relative, repartițiile tensiunii pe înfășurare pentru toate cazurile studiate și se vor interpreta rezultatele obținute în sensul evidențierii nivelului maxim al tensiunii apărute, al momentului în care apare această solicitare maximă, precum și a zonei de înfășurare cel mai solicitate.