

# Regimul tranzitoriu al transformatorului la supratensiune.

Eugeniu CATLABUGA, Mihai ARNĂUT

Universitatea Tehnică a Moldovei  
[ecatlabuga@mail.md](mailto:ecatlabuga@mail.md)

**Abstract-** În lucrare se propun ecuațiile în formă complexă cu funcții hiperbolice și diferențiale pentru calcularea regimului tranzitoriu al transformatorului de putere mare la intrarea undei de tensiune înaltă. Se prezintă curba procesului tranzitoriu de distribuție a tensiunii dealungul înfășurării primare calculată cu ecuațiile propuse.

**Cuvinte cheie:** regim tranzitoriu, schemă echivalentă, ecuație cu funcții hiperbolice.

## I. ÎNTRUCERERE.

În rețelele electrice lungi și de înaltă tensiune pot să apară diferite perturbații care pot produce supratensiuni în transformator. În aceste cazuri nu este semnificativă atât de mult valoarea tensiunii la intrarea înfășurării primare al transformatorului (Tr) de putere decât repartizarea acestei tensiunii de-a lungul înfășurării, adică tensiunea care se creează între spire și tensiunea spirelor față de pământ. În acest sens, ca fenomene perturbatoare intră în discuție undele călătoare lungi, sau scurte cu un front mai mult sau mai puțin abrupt și oscilațiile de frecvență înaltă ale tensiunii.

În urma acestor perturbații (de exemplu, la descărcări atmosferice) în înfășurarea primară a transformatorului apar fenomene tranzitorii, care pot periclită funcționarea sa normală pe o durată de timp scurtă, ceea ce se reflectă asupra consumatorilor conectați la rețeaua electrică și asupra aparatelor electrice de protecție. Procesele tranzitorii care apar în acest caz cer o tratare matematică mai riguroasă, ceea ce se va prezenta în continuare în lucrare.

## II. ECUAȚIILE PROCESULUI TRANZITORIU.

Pentru a studia procesele tranzitorii, care apar în transformator la supratensiuni, schema echivalentă obișnuită a sa cu rezistențe și inductivități legate în serie devine inaccesibilă. În transformatorul real, în afară de inductivitatea lineică  $L$  și rezistența  $r$  a înfășurării, mai sunt și capacități între spirele bobinelor înfășurării, între înfășurări și părțile legate la pământ ale transformatorului. La frecvența de  $50\text{Hz}$  rezistența capacitivă  $1/\omega C$ , creată de acestea capacități este foarte mare deaceia curenții capacitivi se vor neglija, față de curentul care trece prin rezistențele și inductivitățile nesemnificative ale înfășurării. La frecvențe înalte, ceea ce este caracteristic pentru cazul în studiu, neglijarea legăturilor capacitivă nu se admit. În acest caz schema echivalentă [1, Fig.2-186] a transformatorului se complică, fiecare element a înfășurării primare și secundare va avea rezistențe, inductivități lineice și mutuale, capacități față de elementele adiacente ale înfășurării și față de elementele legate la pământ ale transformatorului. Utilizarea acestei scheme echivalente pentru calcularea proceselor tranzitorii reprezintă dificultăți, deaceia pentru unde de frecvențe înalte, care apar

în rezultatul descărcărilor electrice sau fulgere, care crează în liniile de transmisie a energiei electrice impulsuri aperiodice de amplitudine înaltă și de durată mică (câteva zecimi de secunde) de acțiune, se utilizează schema echivalentă simplificată din Fig.1.

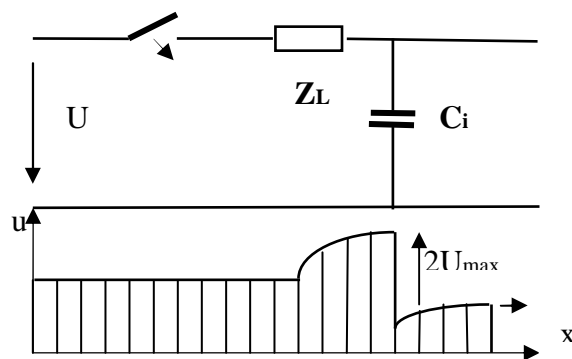


Fig.1. Schema echivalentă și unda de tensiune înaltă.

Unda de tensiune ajunsă în transformator îl percepe ca o capacitate de intrare  $C_i$ . La început ( $t = 0$ ) viteza de variație a tensiunii de undă este infinită, deaceia rezistența transformatorului va fi egală cu zero, ceea ce corespunde regimului de scurt circuit la capetele de ieșire a liniei de transmisie. Tensiunea la transformator va cădea până la zero, dar în continuare capacitatea  $C_i$  se va încărca și ca urmare tensiunea la transformator va crește, ceea ce va fi echivalent cu regimul de funcționare în gol a liniei de transmisie. În acest regim tensiunea  $U$  la transformator se modifică de la zero până la o mărime dublă comparativ cu tensiunea undei, adică va fi egală cu  $2U_{\max}$  (Fig.1).

Ecuția diferențială a regimului tranzitoriu, în corespundere cu schema echivalentă din Fig.1 se descrie astfel:

$$Z_L i + u_c = u(t), \quad (1)$$

deoarece  $i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C_i u_c) = C_i \frac{du_c}{dt}$ , în care  $u_c$  - tensiunea la capacitatea de intrare a Tr;  $q$  - mărimea sarcinii la condensator;  $Z_L$  - impedanța critică a liniei, atunci ecuația (1) va avea expresia:

$$Z_L C_i \frac{du_c}{dt} + u_c = u(t) \quad (2)$$

Regimul tranzitoriu se determină ca suprapunerea regimului liber peste regimul permanent, adică:

$$u = u_p + u_{cl}, \quad (3)$$

unde  $u_p$  - tensiunea la transformator în regim permanent;

$u_{cl}$  - tensiunea în regim liber.

Regimul liber va fi soluția ecuației:

$$Z_L C_i \frac{du_c}{dt} + u_{cl} = 0, \quad (4)$$

care are ecuația caracteristică:

$$z_l C_i p + 1 = 0 \quad (5)$$

cu o singură rădăcină :  $p = -\frac{1}{z_l C_i}$ .

Din soluția ecuației (4), rezultă expresia:

$$u_{cl} = A \cdot e^{-\frac{t}{z_l C_i}} \quad (6)$$

Substituind în ecuația (3) ecuația (6) rezultă:

$$u = u_p + A \cdot e^{-\frac{t}{z_l C_i}} \quad (7)$$

Constanta de integrare  $A$  se determină din condiția inițială:  $t = 0; u = 0$ . Atunci din (7), rezultă  $A = -u_p$ . Tensiunea

în regim permanent va fi egală cu tensiunea  $U_l$ , la bornele de intrare a transformatorului. Deci, ecuația finală pentru calcularea variației tensiunii în regim tranzitoriu în corespundere cu (7) va avea expresia:

$$U = U_l (1 - e^{-\frac{t}{z_l C_i}}), \quad (8)$$

în care  $U_l = 2U_{max}$ . Timpul de stabilire a tensiunii  $U_l$  la transformator practic este egal cu  $(3 \div 4) \cdot z_l C_i$ , pentru parametrii tipici  $z_l = 400 \text{ Ohm}$  și  $C_i = 10^{-10} \text{ F}$  timpul este de  $0,1 - 0,2 \mu\text{s}$ .

### III. STUDIUL PROCESULUI TRANZITORIU.

Peste un anumit interval de timp, la intrarea undei în transformator, fiecare punct al înfășurării sub acțiunea tensiunii constante a undei acumulează un potențial stabil. În cazul unei înfășurări uniforme cu capătul  $X$  legat la pământ distribuția potențialurilor va fi liniară [2, Fig.2]. Deaceia, procesul de intrare a undei în Tr se poate studia ca o trecere treptată a distribuției tensiunii dela momentul inițial de timp  $t = 0$  până la cel final  $t = \infty$ . Acest proces tranzitoriu se manifestă prin apariția oscilațiilor electromagnetice, condiționate de inductivitatea, capacitatea și rezistența a anumitor elemente a înfășurării. Aceste oscilații au un caracter amortizant datorită pierderilor în rezistențele înfășurării, totodată tensiunea tinde spre valoarea ei finală, egală cu cea nominală pentru transformator.

În continuare (Fig.2) se prezintă graficul variației tensiunii în înfășurarea transformatorului. Pentru calcularea

graficului s-au folosit ecuația cu funcții hiperbolice în complex (15) din [2], a tensiunii undei

$$U(x) = U_1 (Ch^2 gx - Sh^2 gx) / Chgx$$

la intrarea în Tr, care permite cu exactitate calcularea repartiției inițiale a tensiunii în circuitul capacitativ a înfășurării, deasemenea și ecuația (8) din lucrare. Rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Tabel. Datele pentru construirea graficului  $U(t)$

X	U(x), kV	g	Z, Ohm	Ci, F	t, mks	U, kV
1,0E+00	4,5E-02	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	1,0E-01	1,1E-15
9,0E-01	1,2E-01	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	9,0E-02	2,8E-15
8,0E-01	3,4E-01	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	8,0E-02	6,7E-15
7,0E-01	9,1E-01	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	7,0E-02	1,6E-14
6,0E-01	2,5E+00	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	6,0E-02	3,7E-14
5,0E-01	6,7E+00	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	5,0E-02	8,5E-14
4,0E-01	1,8E+01	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	4,0E-02	1,8E-13
3,0E-01	5,0E+01	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	3,0E-02	3,7E-13
2,0E-01	1,3E+02	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	2,0E-02	6,6E-13
1,0E-01	3,2E+02	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	1,0E-02	8,3E-13
0,0E+00	5,0E+02	1,0E+01	4,0E+02	1,0E-10	0,0E+00	0,0E+00

În continuare este prezentată curba procesului tranzitoriu,  $U = f(t)$  în interiorul înfășurării primare a Tr.

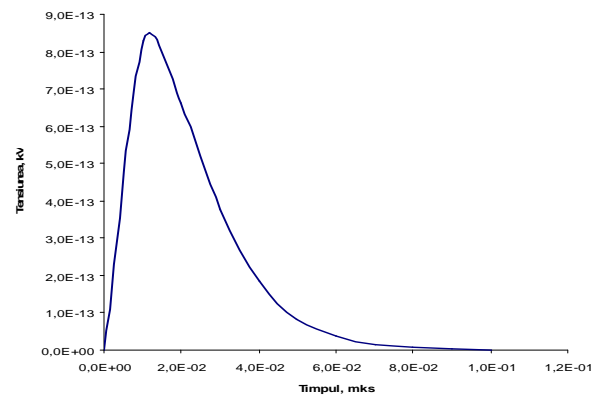


Fig.2 Curba procesului tranzitoriu pentru tensiunea undei  $U = 500 \text{ kV}$  dealungul înfășurării primare  $x$  a Tr.

Se observă, aproximativ peste  $10^{-5} \text{ s}$  după intrarea undei, tensiunea începe brusc să mărească și la  $t = 0,01 \mu\text{s}$  ea devine maximală după aceasta datorită repartiției tensiunii în lungimea înfășurării cu rezistențe și inductivități în creștere tensiunea ei descrește și la final se apropie de zero.

### REFERINȚE

- [1] Г. Н. Петров. Электрические машины. Часть 1. Введение. Трансформаторы. Энергия, 1974.
- [2] E. Catlabuga. Fenomene de supratensiune în transformator 6<sup>th</sup>-ICMCS, Chisinau, Republic of Moldova, 2009.