

PROPAGATION OF OVERVOLTAGE WAVES IN ELECTRICAL TRANSFORMERS WITH GUARD RING**PROPAGAREA UNDELOR DE SUPRATENSIUNE ÎN TRANSFORMATOARE PREVĂZUTE CU INEL DE GARDĂ**

Alina VIIȘOREANU-RĂCHIȚEANU¹ și Alexandru-Marius VIIȘOREANU²
^{1,2}Universitatea POLITEHNICA din București, România
alina.rachiteanu92@yahoo.com¹, alex.viisoreanu@yahoo.ro²

Abstract. The paper presents a study based on numerical simulation methods of electrical circuits which analyzes the influence of the internal protection elements of the transformer on atmospheric overvoltage. The difference between the time variation curves of the overvoltages propagated along the high voltage range with and without guard ring is shown as the internal protection element of the transformer.

Rezumat. În lucrare se prezintă un studiu bazat pe metodele numerice de simulare ale circuitelor electrice prin care se analizează influența elementelor de protecție interioară ale transformatorului la supratensiuni atmosferice. Se arată diferența dintre curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune cu și fără inel de gardă, ca element de protecție interioară a transformatorului.

1. INTRODUCERE

Undele de supratensiune provocate de trăsnet, care lovesc liniile de transport a energiei electrice, se propagă pe aceste linii și pot produce avarii importante dacă nu se iau măsuri speciale de protecție. Aceste supratensiuni ajung mai întâi la înfășurările de înaltă tensiune ale transformatoarelor electrice de putere aferente acestor linii. Protecția acestor transformatoare împotriva undelor de trăsnet se realizează prin două categorii de metode: metode exterioare și metode interioare [1], [2], [3].

Metodele exterioare reduc undele de supratensiune înainte de a ajunge la bornele de intrare ale transformatoarelor electrice și sunt, în principal, următoarele: descărcătoarele cu rezistență variabilă și eclatoarele.

Descărcătoarele cu rezistență variabilă se conectează între linia de transport a energiei electrice și pământ. Dacă tensiunea liniei este egală cu valoarea nominală a acesteia atunci rezistența electrică a descărcătorului este foarte mare și acesta nu influențează practic funcționarea liniei. La apariția unei supratensiuni de trăsnet rezistența descărcătorului scade rapid și sarcina electrică datorată trăsnetului se descarcă în pământ. Descărcătoarele pentru protecția la supratensiuni a rețelelor electrice de înaltă tensiune se impart în două categorii: descărcătoare cu oxizi metalici fără eclatoare de amorsare și descărcătoare cu carbură de siliciu cu eclatoare de amorsare și rezistoare de șuntare. Diferențele dintre cele două tipuri de descărcătoare sunt doar din punct de vedere constructiv [8].

Eclatoarele se montează între borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului și pământ. La apariția unei supratensiuni de trăsnet de valoare mult mai mare decât tensiunea nominală a liniei electrice apare fenomenul de străpungere a aerului dintre extremitățile eclatorului și sarcina electrică datorată trăsnetului se descarcă în pământ.

Metodele interioare de protecție la supratensiuni se realizează practic prin măsuri constructive care se aplică înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului, deoarece aceasta este conectată la linia de transport a energiei electrice. Aceste metode constau în utilizarea câtorva procedee constructive speciale cum ar fi:

- Întărirea izolației de intrare a înfășurării de înaltă tensiune pentru primele 5 ... 10% ale spirelor acesteia;
- Folosirea unui inel de gardă care reprezintă de fapt o spiră circulară întreruptă;
- Utilizarea unui ecran cilindric de protecție secționat după generatoare pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit;
- Intercalarea sau întreșerea spirelor înfășurării folosită la înfășurările în galeți.

Întărirea izolației spirelor de intrare ale înfășurării de înaltă tensiune conduce la creșterea grosimii izolației acestor spire și la mărirea distanței dintre spire cu consecințe asupra scăderii capacității dintre acestea. Din această cauză, se preferă ca pentru spirele de intrare să se folosească o izolație cu caracteristici dielectrice superioare, pentru a rămâne pe cât posibil capacitatea dintre spire neschimbată, pe toată lungimea înfășurării de înaltă tensiune. Unele firme constructoare utilizează, pentru spirele de intrare ale înfășurării, conductoare de înălțime mai mare, care conduce la mărirea capacității dintre spire.

Modificarea capacității dintre spirele de intrare ale înfășurării de înaltă tensiune, respectiv modificarea dintre aceste spire și masă se poate face prin folosirea unui inel de gardă care se conectează la borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune. Acesta se realizează prin bandajarea cu o bandă realizată dintr-o țesătură metalică, a unui inel realizat dintr-un material izolant. Țesătura metalică cu care se bandajează inelul este întreruptă pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit. Țesătura metalică se folosește pentru evitarea producerii unor pierderi suplimentare provocate de câmpul magnetic de dispersie la funcționarea în sarcină a transformatorului, cu consecințe nedorite din punct de vedere termic.

La transformatoarele cu înfășurări cilindrice stratificate se pot utiliza ecrane cilindrice metalizate, dispuse la exteriorul înfășurării de înaltă tensiune și conectate la borna de intrare a înfășurării. Ecranul este secționat după generatoare pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit.

De asemenea, ecranul cilindric prezintă foarte multe tăieturi, paralele cu generatoarea, pentru a nu produce pierderi suplimentare mari de către curenții induși de câmpul magnetic de dispersie la funcționarea în sarcină a transformatorului.

Intercalarea spirelor înfășurării de înaltă tensiune se poate realiza pentru înfășurările realizate în galeți, numai în cazul în care spira este formată din două sau mai multe conductoare elementare conectate în paralel. Prin această intercalare conductoarele elementare ale unei spire care se succed în circuitul electric al acesteia nu mai sunt așezate alăturat ci sunt intercalate. În literatura tehnică, procedeul de intercalare pentru conductoarele elementare ale spirei se mai numește și transpoziția conductoarelor elementare ale acesteia. Această transpoziție se realizează pe toată lungimea înfășurării de înaltă tensiune.

2. ELEMENTELE DE PROTECȚIE INTERIOARĂ ALE TRANSFORMATORULUI LA SUPRATENSIUNI ATMOSFERICE

Cele mai importante elemente de protecție interioară enumerate în paragraful anterior sunt folosirea unui inel de gardă și utilizarea unui ecran cilindric de protecție secționat după generatoare.

În Fig. 1 se prezintă schematic un transformator monofazat, prevăzut cu inel de gardă și cu ecran de protecție. Se constată că la borna de intrare A, a înfășurării de înaltă tensiune AX se conectează atât inelul de gardă cât și ecranul de protecție.

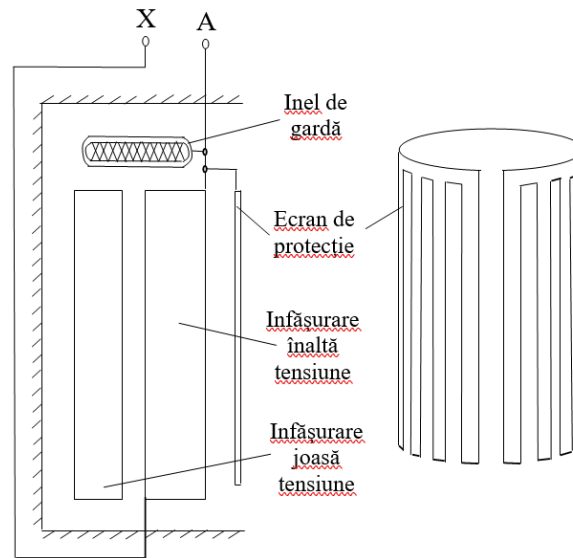


Fig. 1. Înfășurările și elementele de protecție interioară, la supratensiuni atmosferice, ale transformatorului

Cele două elemente de protecție interioară prezintă avantajul că diminuează șocul inițial datorat frontului undei de supratensiune atmosferică în sensul că unda de supratensiune se repartizează mai uniform de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune și ajută la protecția dielectrică a spirelor de intrare ale acestei înfășurări.

3. INFLUENȚA INELULUI DE GARDĂ ASUPRA REPARTIȚIEI SUPRATENSIUNII DE-A LUNGUL ÎNFĂȘURĂRII

Pentru început, se consideră cazul din lucrarea [4] și [6] în care se prezintă schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni, în lipsa atât a ecranului de protecție cât și a inelului de gardă. Această schemă echivalentă este prezentată în Fig. 2 și este formată din 6 secțiuni identice din punct de vedere al parametrilor acestor secțiuni. Valorile celor 5 parametrii care apar în această schemă sunt următoarele [4]: $R_{oL} = 2 \Omega$, $R_{oT} = 2000 \text{ M}\Omega$, $L_{oL} = 2 \text{ mH}$, $C_{oL} = 2.2 \text{ nF}$, $C_{oT} = 5.5 \text{ nF}$. Aceste valori sunt denumite în continuare „valori de referință”.

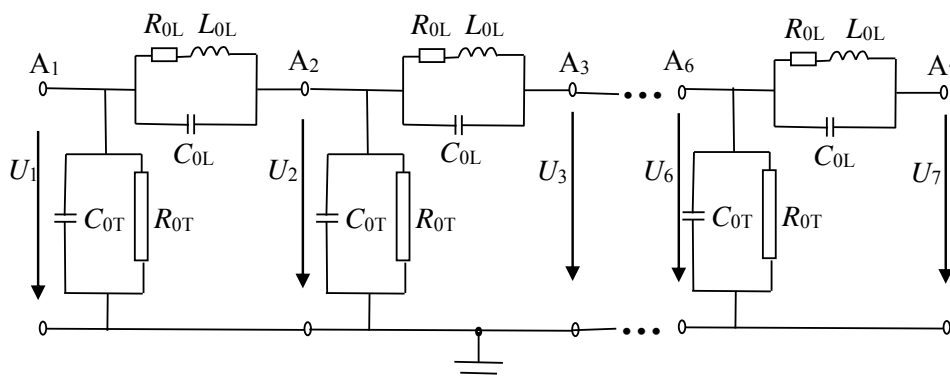


Fig. 2. Schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni considerând valori identice ale celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune

Se aplică la borna de intrare a transformatorului un impuls dreptunghiular de tensiune standard, a cărei valoare de vârf este de $U = 1\text{kV}$. Se modelează în LT Spice propagarea în timp și spațiu a unei de supratensiune, pentru valorile de referință, de mai sus, ale parametrilor schemei echivalente și se obțin curbele din Fig. 3.

Este evident, că modelarea în timp a undelor de tensiune sunt funcții continue, dar modelarea în spațiu o reprezintă cele 6 funcții discrete, reprezentând tensiunile determinate la cele șase borne de intrare A_1, A_2, \dots, A_6 , ale celor șase circuite discrete în care s-a împărțit înfășurarea de înaltă tensiune a transformatorului.

Curbele prezentate în Fig. 3 reprezintă variația în timp a undelor de supratensiune calculate pentru bornele de intrare A_1, A_2, \dots, A_6 , în cazul în care nu se consideră nici prezența inelului de gardă și nici prezența ecranului de protecție.

Determinarea capacității ecranului de protecție și influența acestuia asupra repartiției unei de supratensiune de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune este realizată în lucrarea [5] și nu face obiectul prezentei lucrări.

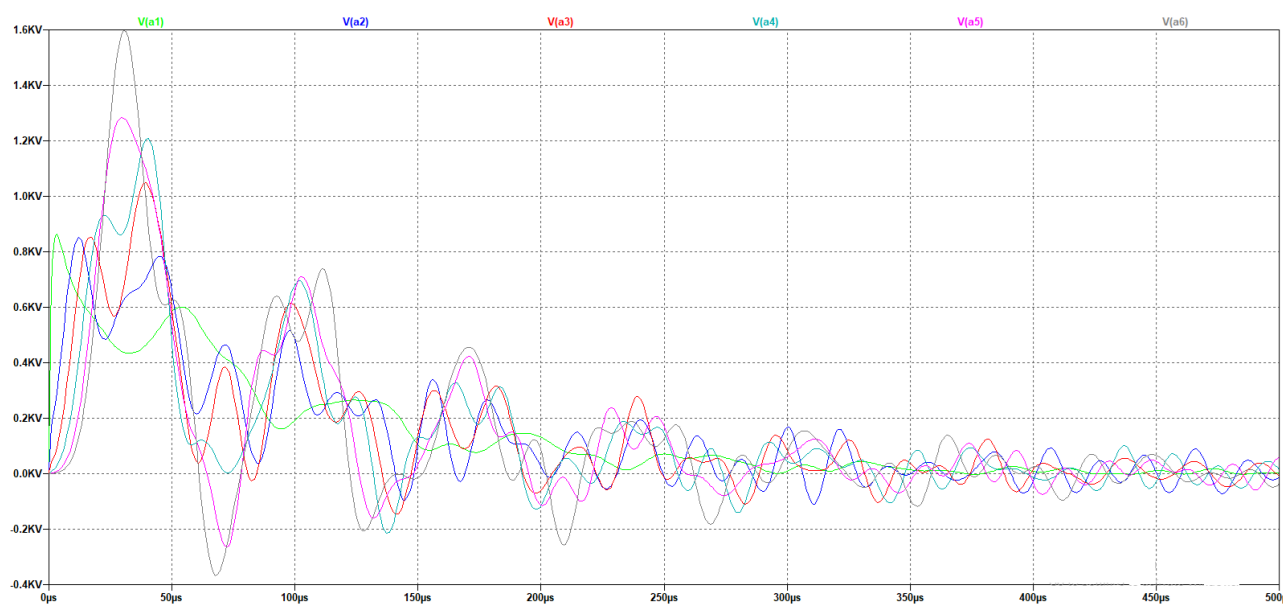


Fig. 3. Curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, simulate pentru bornele de intrare ale celor 6 secțiuni, considerand schema electrică prezentată în Fig. 2. Legenda culorilor curbelor este următoarea: borna A1 – culoarea verde; borna A2 – culoarea albastru închis; borna A3 – culoarea roșie; borna A4 – culoarea albastru deschis (bleu); borna A5 – culoarea magenta; borna A6 – culoarea neagră.

În prezenta lucrare se analizează situația în care transformatorul este prevăzut doar cu inel de gardă, iar ecranul de protecție lipsește. În acest caz, se studiază influența inelului de gardă asupra schemei echivalente a transformatorului. Așa cum se prezintă în lucrarea [7], atât ecranul de protecție cât și inelul de gardă sunt introduse în schema echivalentă la supratensiuni ale transformatorului prin capacități suplimentare conectate între înfășurarea de înaltă tensiune și masă. Inelul de gardă se conectează electric la borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune. Pentru a lua în seamă prezența inelului de gardă asupra schemei echivalente se consideră că acesta introduce în schema echivalentă la supratensiuni, 6 capacități corespunzătoare celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune. Se face ipoteza ca valorile acestor capacități sunt diferite pentru cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune,

cea mai mare valoare fiind asociată secțiunii de la intrarea înfășurării și cea mai mică valoare fiind asociată ultimei secțiuni de la finalul înfășurării de înaltă tensiune.

În Fig. 4 se prezintă schema echivalentă a transformatorului considerând că acesta este prevăzut doar cu inel de gardă nu și cu ecran de protecție.

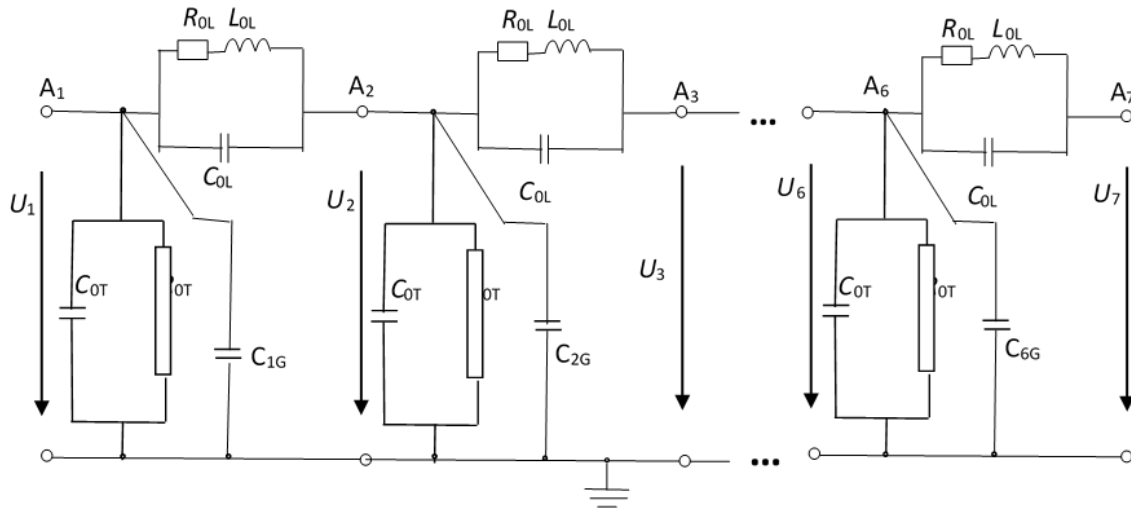


Fig. 4. Schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni considerând și existența inelului de gardă

După cum se observă, inelul de gardă introduce în schema echivalentă a transformatorului capacitățile C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G} , capacități care formează un șir descrescător, cea mai mare valoare fiind asociată primei secțiuni de intrare A_1 a transformatorului. Se face ipoteza ca cele 6 capacități, caracteristice inelului de gardă, corespunzătoare schemei echivalente din Fig. 4 au valorile prezentate în Tab. 1.

Tab. 1. Valorile capacităților C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G}

C_{1G}	10 nf	10 nF
C_{2G}	$C_{1G}/2$	5 nF
C_{3G}	$C_{1G}/3$	3.3333 nF
C_{4G}	$C_{1G}/4$	2.5 nF
C_{5G}	$C_{1G}/5$	2 nF
C_{6G}	$C_{1G}/6$	1.6666 nF

Această ipoteză presupune că valorile capacităților corespunzătoare inelului de gardă au o descreștere liniară pentru cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune.

În mod asemănător cu simulările efectuate în cazul schemei din Fig. 2 se reiau simulările în programul de calcul LT Spice și se modelează propagarea în timp și în spațiu a aceleiași undă de spratensiune de valoare 1kV, aplicată bornei de intrare a înfășurării de înaltă tensiune, unda care s-a folosit și pentru determinarea caracteristicilor prezentate în Fig. 3. În această nouă situație se obțin curbele prezentate în Fig. 5.

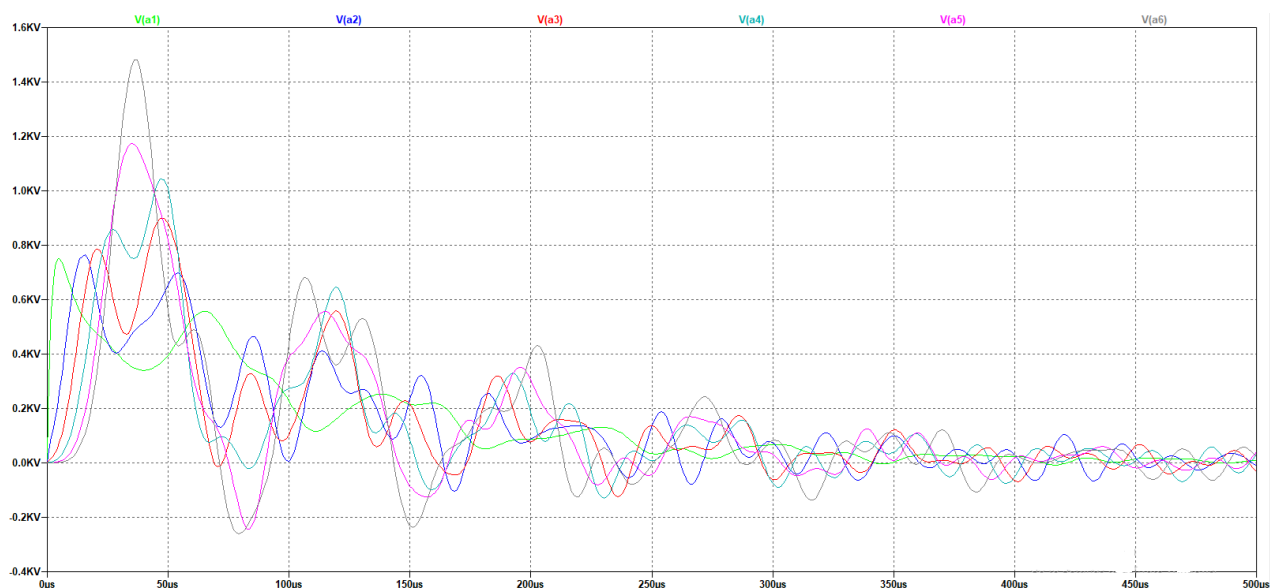


Fig. 5. Curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, simulate pentru bornele de intrare ale celor 6 secțiuni, considerand schema electrică prezentată în Fig. 4. Legenda culorilor curbelor este următoarea: borna A1 – culoarea verde; borna A2 – culoarea albastru închis; borna A3 – culoarea roșie; borna A4 – culoarea albastru deschis (bleu); borna A5 – culoarea magenta; borna A6 – culoarea neagră.

Dacă se compară curbele din Fig. 3 cu celea din Fig. 5 se pot trage două concluzii mai importante cu privire la influența inelului de gardă asupra repartiției undei de supratensiune care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune. Acestea sunt următoarele:

- a. Inelul de gardă conduce la diminuarea maximelor tuturor undelor de supratensiune corespunzătoare celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune, cu valori cuprinse între (7,15 ... 14,30)%. Astfel, reducerile celor mai mari maxime din cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune, datorate prezenței inelului de gardă, sunt prezentate în Tab. 2.

Tab. 2. Valorile procentelor de reducere a maximelor datorate prezenței inelului de gardă

Secțiunea înfășurării de înaltă tensiune	Maximul undei de supratensiune a secțiunii fără considerarea inelului de gardă	Procentul de reducere a maximului datorat inelului de gardă
A ₁	0,86 kV	13,09 %
A ₂	0,85 kV	10,09 %
A ₃	1,04 kV	14,30 %
A ₄	1,20 kV	13,82 %
A ₅	1,28 kV	8,58 %
A ₆	1,59 kV	7,15 %

- b. Introducerea inelului de gardă are o influență și asupra vitezei de propagare a undei de supratensiune de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune. Astfel, prezența inelului de gardă conduce la scăderea vitezei de propagare a supratensiunii cu aproximativ 7%.

4. CONCLUZII

Inelul de gardă folosit ca mijloc de protecție la supratensiuni a transformatoarelor electrice este important deoarece conduce la reducerea maximelor undelor de supratensiune care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune ale acestor transformatoare.

Pe de altă parte, inelul de gardă mai are influență asupra vitezei de propagare a unde de supratensiune în sensul scăderii acesteia cu aproximativ 7 procente. Existența inelului de gardă are influență asupra schemei echivalente la supratensiuni a transformatorului deoarece prezența acestui inel introduce în schema echivalentă capacități aferente tuturor celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune [7].

Studiul realizat în prezenta lucrare nu consideră și existența unui ecran de protecție la supratensiuni pentru transformatorul studiat.

BIBLIOGRAFIE

- [1] C. Bălă, *Mașini electrice (Electric Machines)*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [2] D. Gleb, *Tehnica tensiunilor înalte (High Voltage Techniques)*, vol. 2, Editura Academiei Române și Editura AGIR, București, 2001.
- [3] Heller, B., Veverka, A. *Stossercheinungen in elektrischen Maschinen*, Berlin, VEB Verlag Technik, 1957.
- [4] Ioan - Dragoș Deaconu, Aurel - Ionuț Chirilă, Valentin Năvrăpescu, Alina Răchițeanu, Alexandru - Marius Vișoreanu, Constantin Ghiță, Cristina - Gabriela Sărăcin, *Lightning Impulse Voltage Modeling for Transformer Windings Testing*, The 11-th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, March 28 – 30 2019, Bucharest Romania;
- [5] Ioan - Dragoș DEACONU, Aurel - Ionuț CHIRILA, Constantin GHITA, Valentin NAVRAPESCU, Alina RACHITEANU, Alexandru - Marius VIȘOREANU, Sergiu Valentin POPESCU, Corina - Ioana GHEORGHIU, Cristina - Gabriela SARACIN, *Determination of the Electric Capacitance of the Overvoltage Protective Shield of an Electric Transformer*, The 12-th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, March 25 – 27, 2021, Bucharest, Romania.
- [6] Aurel-Ionuț CHIRILĂ, Ioan-Dragoș DEACONU, Valentin NĂVRĂPESCU, Constantin GHIȚĂ, Alina RĂCHIȚEANU, Alexandru-Marius VIȘOREANU, *The Influence of Parameters of a Power Transformer Winding Equivalent Distributed Circuit Model on Atmospheric Overvoltage Wave Internal Propagation along the Windings*, The 11th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE 2020, October 22 – 23, Iași, Romania.
- [7] M. Kostenko, L. Piotrovski, *Machines Electriques*, Edition Mir, Moscou, 1969, Tome I, *Machines a courant continu et transformateurs*, pag. 536 – 540.
- [8] Alina VIȘOREANU-RĂCHIȚEANU, Alexandru-Marius VIȘOREANU, *Overvoltage protection of transformers and high voltage networks by surge arrester*, Revista Energie, Mediu, Eficienta, Resurse, Globalizare – EMERG, Nr. 2. 2020, Pag. 87 – 97; DOI: 10.37410/EMERG.