

TRANSFORMATORUL ELECTRIC – O INVENȚIE CARE A REVOLUȚIONAT INGINERIA ELECTRICĂ

Elena HELEREA¹, Marius Daniel CĂLIN²

^{1,2} Universitatea Transilvania din Brașov

helerea@unitbv.ro¹, marius.calin@unitbv.ro²

Rezumat. Transformatorul este echipamentul care a revoluționat transportul la distanță a energiei electrice. Multe din aplicațiile electricității sunt legate de acest echipament electric, conceput și perfecționat prin contribuția numeroșilor experimenatori, oameni de știință, ingineri și tehnicieni, într-o perioadă de peste două sute de ani de eforturi creatoare. În această lucrare sunt sintetizate etapele de acumulare de cunoaștere științifică și tehnică în domeniul electromagnetismului, care au condus la brevetarea și construirea primului transformator electric în anii 1884-1885. Pe lângă reperele cronologice ale genezei transformatorului electric sunt ilustrate și contribuțiile aduse de acest echipament pentru inaugurarea unei noi etape în dezvoltarea societății omenești, bazată pe confort și productivitate. Noile direcții de cercetare-dezvoltare în care sustenabilitatea este elementul cheie arată că transformatorul electric nu va rămâne doar un artefact conservat în muzee.

1. INTRODUCERE

Amploarea descoperirilor și aplicațiilor în domeniul electromagnetismului de-a lungul secolului al XIX-lea atestă că în această perioadă s-a demarat cea de a treia revoluție tehnico-științifică - era electricității și a aplicațiilor acesteia.

Cunoștințele despre curentul electric, favorizate de existența sursei de curent electric continuu inventată de Alessandro Volta în 1789, s-au amplificat prin avalanșa de experimente care au urmat, care au dus la formularea legilor circuitelor electrice (Ohm, Kirchhoff), a unor legi generale (Ampère, Faraday), care au culminat cu fundamentarea teoriei electromagnetismului, de către Maxwell în anii 1850-1860.

Multe din aplicațiile curentului electric sunt legate de noul echipament electric – transformatorul electric, conceput și perfecționat prin contribuția numeroșilor experimenatori, oameni de știință, ingineri și tehnicieni, într-o perioada de peste o sută de ani de eforturi creatoare.

În acest articol se prezintă și se analizează etapele și factorii prin care s-a acumulat cunoaștere științifică și tehnică pentru ca în anii 1884-1885 să fie brevetat și apoi construit primul transformator electric. O prezentare a primilor pași în conceperea principiului de funcționare, a elementelor componente, a structurii și a construcției transformatorului electric este descrisă în lucrările [1] și [2].

Noi elemente referitoare la acest subiect sunt identificate în multe alte publicații [3]-[5]. Sunt aspecte evidente care relevă faptul că transformatorul electric este unul din componentele tehnice și tehnologice care a contribuit esențial la inaugurarea noii etape în dezvoltarea societății omenești, bazată pe confort și productivitate, în care sustenabilitatea este elementul cheie.

2. PRIMII PAȘI

Există o serie de evenimente, fapte, acțiuni care au stimulat ideea conceperii unui aparat electric care să îndeplinească funcția de modificare și control a tensiunii și curentului electric, dar există și elemente care au limitat această inovație și au întârziat crearea acestui echipament, care în perioada actuală de electrificare a tuturor sectoarelor economice este de neînlocuit.

Transformatorul electric nu putea să fie inventat fără ca să fie cunoscut și să fie disponibil curentul alternativ. Totul a început cu experiențele și descoperirea principiului inducției electromagnetice, de către Michael Faraday în 1831 și independent de Joseph Henry în 1832.

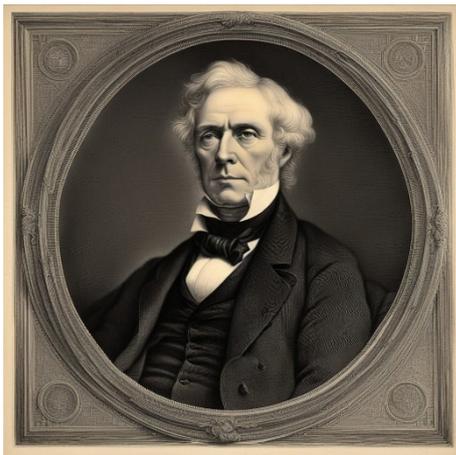


Fig. 1. Michael Faraday (1791-1850)



Fig. 2. Joseph Henry (1797-1878)

Michael Faraday este cel care descrie matematic relația între tensiunea electromotoare și fluxul magnetic, azi cunoscută ca legea inducției electromagnetice. A efectuat multiple experiențe, scopul lor fiind să observe dacă un curent electric continuu și câmpul magnetic produs induce o tensiune electrică în altă bobină. A observat că un curent electric continuu nu are efect asupra unei bobine învecinate, dar, creșterea sau descreșterea curentului electric în prima bobină poate genera o tensiune electrică în a doua bobină [1], [3].

Primul dispozitiv folosit de Faraday (Fig. 3.a) consta din două bobine, prima (primarul) cu dimensiuni astfel ca să poată fi introdusă în a doua bobină (secundar). Faraday descoperă că la introducerea sau scoaterea bobinei primare (alimentate de o baterie electrochimică) din a doua bobină, în bobina secundară apare o tensiune electromotoare care, dacă circuitul celei de-a doua bobine era închis, stabilea un curent electric, pus în evidență cu ajutorul unui galvanometru. Particularitatea acestui curent indus era că avea o variație specifică, după un timp scăzând la zero.

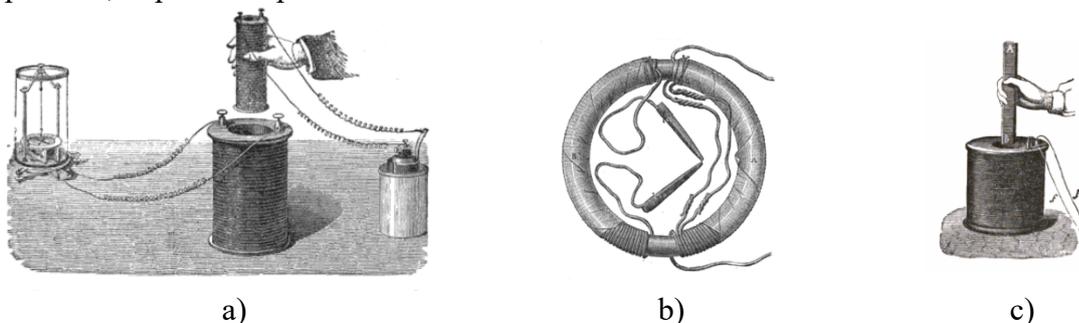


Fig. 3. Experimentele lui Faraday care demonstrează inducția electromagnetică: a) Bobina primară, conectată la baterie se deplasează în interiorul bobinei secundare iar a doua bobină este legată la un galvanometru; b) cele două bobine sunt dispuse pe un miez toroidal de fier; c) bobina primară este înlocuită cu un magnet permanent; după [1]

Un al doilea aranjament utilizat de Faraday (Fig. 3.b) demonstrează o altă modalitate de a obține fenomenul de inducție electromagnetică. Cele două bobine, având același număr de spire, sunt dispuse pe un miez de fier toroidal. Tensiunea electromotoare în bobina secundară se obține la închiderea sau deschiderea circuitului din primar. De fapt, această structură corespunde cu aceea a unui transformator electric cu raport de transformare unu. Cu acest dispozitiv Faraday observă descărcări electrice la bornele bobinei secundare. O altă structură propusă de Faraday (Fig. 3.c) în care bobina primară este înlocuită cu un magnet permanent stă la baza principiului de funcționare a mașinilor electrice.

Joseph Henry, la Academia din Albany, New York, cu o structură asemănătoare, obține o descărcare electrică și observă că întreruperea curentului în înfășurarea primară are efect mult mai puternic decât cea obținută la cuplarea alimentării bobinei primare.

Observațiile aduse de Faraday și Henry referitoare la producerea de descărcări electrice la bornele bobinei secundare au constituit un îmbold important pentru experimentările ulterioare, care au avut ca scop obținerea de scântei electrice din ce în ce mai puternice, rezultatul fiind obținerea bobinei de inducție, numită la acea vreme „inductor” sau „generator secundar” (Fig. 4).

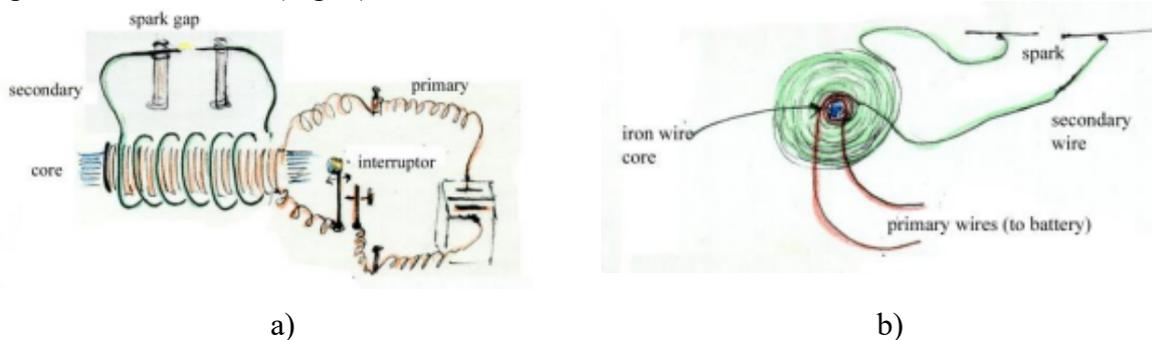


Fig. 4. Bobina primitivă de inducție: a) vedere a bobinei de inducție cu circuitul de alimentare; b) secțiune transversală prin bobina de inducție; după [5]

Experiențele din anii următori au confirmat că la bornele bobinei indus (secundară) se pot obține tensiuni electrice mult mai mari decât cea furnizată de bateria electrică cuplată la înfășurarea primară. Specific pentru bobina de inducție era faptul că înfășurarea primară avea spire mai puține și de secțiune mai mare, față de bobina secundară, cu mult mai multe spire și cu secțiune a conductorului mult mai mică. Cele două înfășurări sunt suprapuse și dispuse pe un miez de fier.

Dar, între momentul lansării conceptului bobinei toroidale al lui Faraday și bobina de inducție ajunsă la o formă performantă abia în anii 1850, au existat numeroase propuneri de dispozitive cu multiple structuri și caracteristici.

3. BOBINA DE INDUCȚIE - UN TRANSFORMATOR PRIMITIV

Principalele elemente care apar în cercetarea lui Joseph Henry sunt legate de constatarea că la întreruperea unui circuit electric format dintr-un fir conductor și o sursă de curent electric (baterie) are loc o descărcare electrică. Aceasta era pusă în evidență prin șocul produs asupra experimentatorului, ale cărui mâini erau conectate la capetele firului conductor. Henry constată că electricitatea produsă este amplificată când în circuit se folosesc bobine plate, confecționate din bandă sau fâșii de cupru, dispuse spiralat (Fig. 5.a).

Despre experimentele lui Henry află și fizicianul și profesorul de chimie Charles Grafton Page (1812-1862) în anul 1836 [6]. Page, un inventator neobosit, introduce noi tipuri de experimente în care fenomenele electrice studiate sunt puse în evidență prin șocurile electrice produse în corpul uman, fapt care reflectă practicile comune și des utilizate pentru

observarea electricității produse în baterii la acea vreme. Merită menționat că în perioada de început a aplicațiilor electromagnetismului, în lipsa unor instrumente adecvate de măsurare, în vederea punerii în evidență a fenomenelor electromagnetice, experimenterii își foloseau corpul: senzațiile la șocul electric reprezenta o măsură a intensității fenomenului electric produs. Experimentatorul căuta vizual scânteii, le asculta zgomotul produs și le compara calitativ. Mai semnificative erau rezultatele atunci când se urmăreau efectele șocurilor electrice produse la atingerea cu mâinile a mânerelor metalice conectate la circuitul de experimentat.

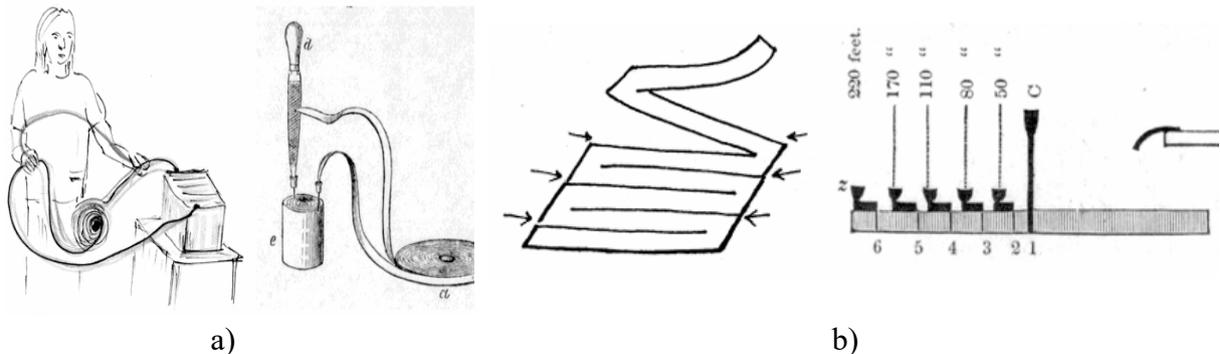


Fig. 5. Măsurarea șocului electric: a) experimentul lui Henry cu fir și cu bobină plată spiralată; b) experimentul lui Page, cu procedeul de preparare a foliei de cupru și cu dispunerea ploturilor de măsurare; după [6]

Page realizează o bobină spiralată folosind materialele la îndemână (Fig. 5.b). În lipsa unei benzi adecvate de cupru pentru formarea bobinei spirale, el a construit dispozitivul cu benzi din foi plate de cupru. Pentru aceasta a tăiat parțial, alternativ, o folie de cupru, pe la capetele opuse ale acesteia, obținând prin desfășurarea acesteia o bandă în zig-zag. Banda a fost astfel îndoită peste ea însăși la fiecare inversare pentru a forma o bandă continuă, plată. A înfășurat întreaga bandă în izolație de bumbac și apoi a înfășurat-o într-o spirală compactă. Cu o lungime de 67,056 m, astfel că efectul bobinei lui Page era mai mult decât dublu față de bobina realizată de Henry. Particularitatea dispozitivului spiralat al lui Page este dată de introducerea unor ploturi conductoare care permiteau accesul în diferite puncte de-a lungul bobinei spiralate (Fig. 5.b). La aceste ploturi și la capetele bobinei, Page adaugă câte o bornă metalică, aceasta având în partea superioară un contact cu un mic vas umplut cu mercur. Acest tip de conexiune flexibilă era utilizat în mod curent la acea vreme de către cercetători și experimenterii.

Construcția lui Page era inovatoare. În circuitele lui Faraday și Henry, doar întreaga bobină putea fi conectată la baterie și corpul experimenterului (Fig. 5.a). Pentru a testa un conductor mai lung sau mai scurt era necesară introducerea în circuit a unui alt conductor. Cu ploturile plasate intermediar, același conductor putea suporta curenți pe toată lungimea sau pe o parte din lungimea lui (Fig. 5.b). În lucrarea [6], în care se explorează începutul dezvoltării bobinei de inducție la sfârșitul anilor 1830, se aduc completări legate de dispozitivul propus de Page (Fig. 6).



Fig. 6. Explicativă la experimentul lui Page: a) bateria alimentează spiralele între ploturile 1 și 2, iar șocul electric este pus în evidență între ploturile 3 și 4 (apoi, succesiv, 5, 6), după [6]

Șocul și scânteia electrică din ce în ce mai puternice produse în astfel de bobine au constituit un feedback pentru numeroasele configurații instrumentale propuse și testate de Page, Callan, Sturgeon, Bachhoffner și alții.

În 1837, inventatorul irlandez Nicholas Joseph Callan (1799-1864) împarte bobina inductorului lui Page în două, fără contact între cele două părți. Callan construiește un inductor în care o bobină (primară) cu un număr mic de spire este conectată la o baterie electrochimică, iar bobina secundară, separată de cea primară, prezintă un număr mai mare de spire. Miezul este o bară de fier. La întreruperea curentului în prima bobină, se obțin scântei electrice puternice la bornele bobinei secundare. Această construcție conține toate datele pentru construcția unui transformator: are două înfășurări separate, are un miez feromagnetic, însă obținerea tensiunii în secundar depindea de viteza cu care circuitul electric era deschis sau închis. Bobina primară se alimenta în curent continuu, deoarece încă nu se cunoștea și nu era disponibil curentul alternativ. Manevrarea cuplării-decuplării bobinei primare se făcea manual. Prin utilizarea unui mecanism de ceasornic, Callan reușește întreruperea curentului electric cu o frecvență de 20 Hz, cu care sunt generate scântei de aprox. 380 mm (60 kV) [5].

Pentru obținerea de tensiuni mai mari în bobina secundară a inductorului sunt propuse diferite soluții de mărire a frecvenței de cuplare/decuplare a bobinei primare (inductoare). Sunt concepute și utilizate diferite tipuri de vibratoare electromecanice: Sturgeon (1837), Bachhoffner și Page (1838), Wagner (1839). În 1856, C.F. Varley utilizează un întreruptor bipolar. Cu aceste sisteme, inductorul se apropie de alimentarea în curent alternativ a bobinei primare.

Una din bobinele de inducție de mare performanță, precursora a transformatorului electric, a fost concepută în anul 1847 și apoi perfecționată în anii 1850 de marele instrumentist Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877). Acesta introduce în circuit un condensator, iar pentru cuplare/decuplare folosește principiul vibratorului electromecanic (Fig. 7). Cu structura propusă prevăzută cu o baterie de doar 15 V pentru alimentarea bobinei primare, Ruhmkorff obține în secundar o tensiune de cca. 100 kV. Descărcările electrice depășeau lungimea de 30 cm, apoi 40 cm.

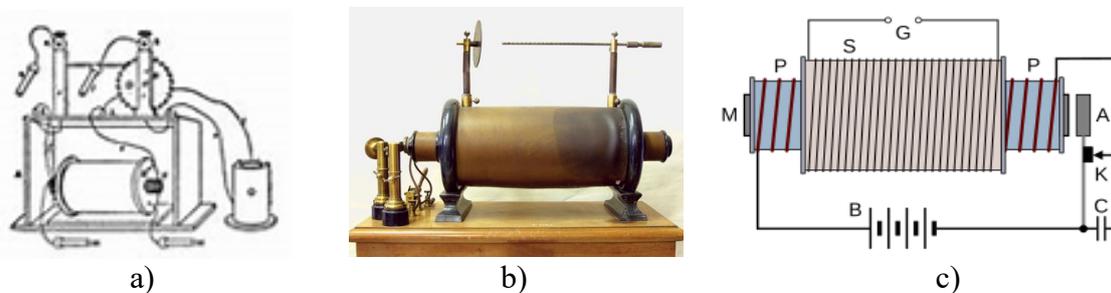


Fig. 7. Bobina de inducție Ruhmkorff: a) schița componentelor – baterie, bobină, condensator, sistem de întrerupere a curentului electric continuu, bornele de înaltă tensiune; b) Vedere de ansamblu-model; c) schema electrică de alimentare; după [7]

A urmat o adevărată competiție privind creșterea lungimii arcului electric produs. În 1876, în Anglia, App obține lungimi ale arcului de 1070 mm. În 1890, la Expoziția de la Paris, Klingenfuss din Elveția prezintă cel mai mare inductor, cu o lungime a descărcării electrice de 1500 mm.

Perfecționările aduse inductoarelor cu descărcări electrice au avut un impact pozitiv semnificativ prin îmbunătățirea tehnologiei de fabricare a bobinajului, în tehnica vibratorilor electromecanice, îmbunătățiri consistente aduse izolației electrice. Pentru confecționarea izolației electrice s-a introdus impregnarea cu ulei a izolației celulozice, folosirea uleiului mineral, bobinajul tip disc (introdusă de Poggendorf), fabricarea de miezuri feromagnetice din tole.

Observațiile și experimentările făcute cu bobina de inducție au contribuit la lărgirea ariei de cunoaștere științifică asupra fenomenelor electromagnetice. Constatarea că în secundarul bobinei de inducție se producea un curent variabil în timp cu o formă de undă asimetrică (la închiderea circuitului primar – durata unde de tensiune era mare dar de amplitudine mică; la deconectarea circuitului primar, durata era redusă, dar de amplitudine mare) a stimulat studiul semnalelor electrice din secundarul inductoarelor. Aceste constatări au fost utilizate mai apoi la îmbunătățirea funcționării lămpilor cu descărcări în gaze de mare intensitate.

Bobina de inducție a fost aplicată în electroterapie, în iluminatul cu lămpile cu arc electric și mai târziu în dispozitivele de producere a razelor X.

Deși bobina de inducție este considerată ca dispozitivul primar care stă la baza invenției transformatorului, elementul care a întârziat conceperea transformatorului electric a fost lipsa sursei de curent alternativ. Saltul se putea produce doar în măsura în care curentul alternativ era disponibil. Abia după ce Maxwell dezvoltă teoria electromagnetismului în anii 1860 și după ce Sebastian Ferranti, care lucra cu Lord Kelvin, propune un sistem de generator de curent alternativ, în 1868 Sir W. Grove conectează o sursă de curent alternativ la un inductor format din două bobine plasate pe un miez de fier [8], [9].

O sintetică asupra saltului făcut în fundamentarea principiului și structurii transformatorului electric în anii 1830-1870 este prezentată în Fig. 8.

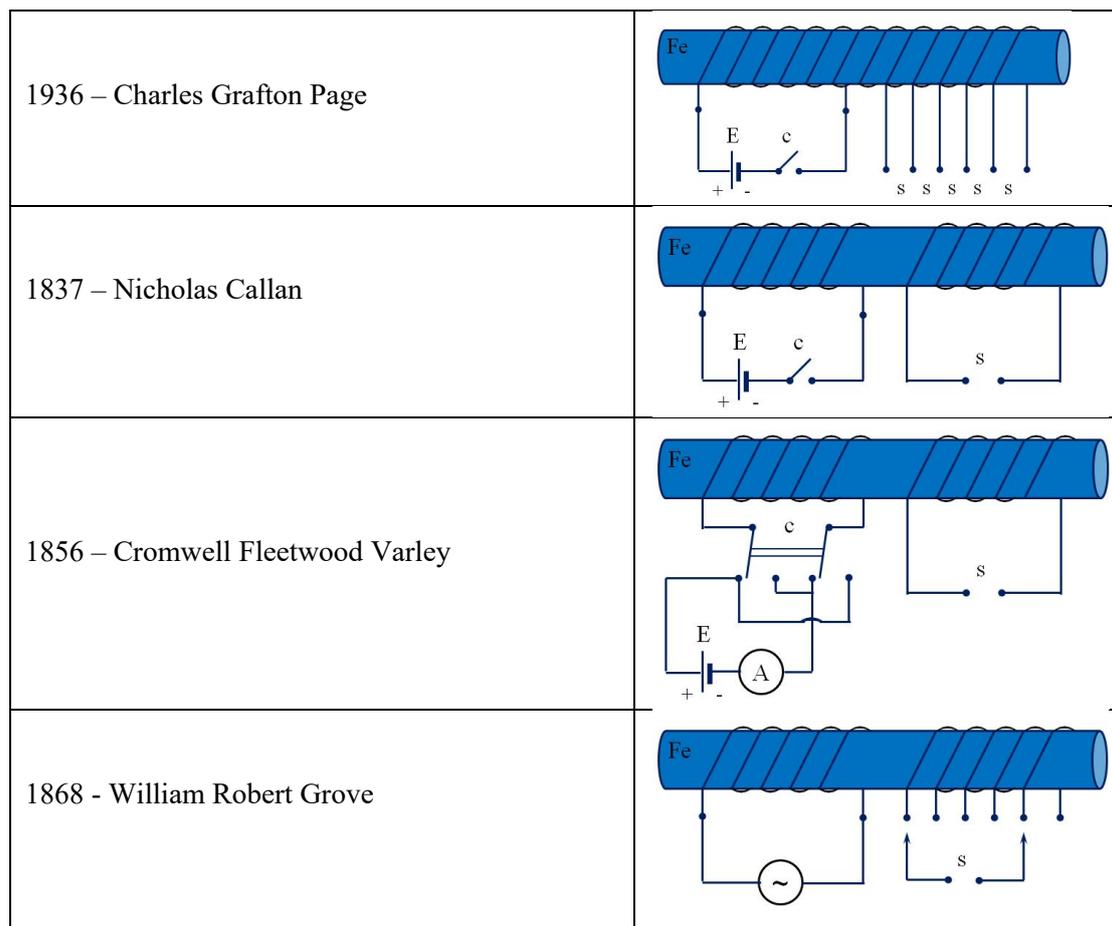


Fig. 8. Pași în fundamentarea principiului și structurii transformatorului electric în anii 1830-1870

William Robert Grove propune un dispozitiv care se apropie de structura și funcționalitatea transformatorului electric: alimentarea în curent alternativ a bobinei primare și obține în secundar o tensiune electrică și curent alternativ.

4. ILUMINATUL ELECTRIC - APLICAȚIA CARE A STIMULAT INVENȚIA TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

Un element care a stimulat conceperea și construcția transformatorului electric a fost iluminatul electric. Încă din anul 1802, în cadrul experiențelor făcute la Societatea Regală din Londra, Humphrey Davy (1778-1829) nota că la bornele bateriei electrice a obținut o lumină puternică. Apoi, a conceput un dispozitiv cu doi electrozi de cărbune cu care reușește să mențină arcul electric între cei doi electrozi timp de câteva minute. Este primul iluminat electric, care a devenit apoi obiect de cercetare. În 1812, Davy face o demonstrație publică cu noua sursă de lumină, însă descărcarea rapidă a bateriei electrice care alimenta acest bec primitiv a făcut ca să se renunțe pentru mult timp la aplicarea practică a acestui sistem de iluminat.

Abia după trei decenii, când au devenit viabile noile baterii electrochimice de mare putere și mult mai durabile, s-a cristalizat ideea aplicării practice a iluminatului electric cu becuri cu arc electric. Se foloseau electrozi de cărbune a căror lungime se regla manual pe măsură ce aceștia se consumau.

Este anul 1848, când Leon Foucault (1819-1868) propune un regulator automat al electrozilor lămpilor cu arc care prelungea funcționarea acestora la câteva ore. S-au putut astfel ilumina electric case, porturi și chiar străzi. Sursele folosite au evoluat, de la baterii electrice la mașini generatoare de curent electric continuu.

Cel care intuiește în anii 1870 că lampa cu descărcări în arc are nevoie de alimentare în curent alternativ este inginerul rus Pavel Iablocikov (1847-1894).

Lampa lui Yablocikov avea o construcție specială (Fig. 9). Avea doi electrozi tip bară din cărbune, fixați în parte inferioară cu un material izolant de ghips plastifiat. La capătul superior, cei doi electrozi erau legați printr-un fir conductor subțire (sau bandă subțire de cărbune). La aplicarea curentului electric acest fir fuzibil se topea și iniția arcul electric, care apoi continua să se dezvolte între cei doi electrozi. Primul bec Iablocikov a fost alimentat de la un generator de curent continuu.



Fig. 9. Modele de lămpi Yablocikov, după [7]

Analizând procesul de producere a arcului electric în lampa cu descărcări de mare intensitate, Iablocikov a constatat că arcul care se produce între cei doi electrozi de cărbune avansează în mod inegal către capătul electrozilor, pe măsură ce electrozii se consumă. La alimentarea în curent continuu, unul din electrozi se consuma mult mai repede decât celălalt. O utilizare a unui curent care alterna ca polaritate ar fi putut rezolva problema consumului inegal de material al electrozilor de cărbune. În acest sens, bobina de inducție oferea un curent alternativ și de înaltă tensiune pentru producerea arcului electric. Având aceste elemente, Iablocikov înregistrează în Franța un brevet pentru acest tip de lampă la care alimentarea era realizată prin cuplarea lămpii la secundarul bobinei de inducție.

Răspândirea ideilor lui Iablocikov s-a făcut rapid, mai ales după participarea sa la Expoziția de la Paris din anul 1877. Pentru această expoziție, Iablocikov utilizează o tensiune de 1000 – 1500 V obținută cu inductoare care puteau alimenta în serie 20 – 30 de lămpi cu arc cu tensiunea de inițiere a arcului de 35 – 40 V. Lungimea circuitului era destul de mare astfel că s-a reușit iluminatul electric pe o zonă destul de extinsă.

Dar marele dezavantaj al acestui sistem era legarea în serie a becurilor. Un defect la una din lămpi influența funcționarea celorlalte lămpi. Pentru a reduce această influență, Iablocikov folosește mai multe inductoare cuplate în serie, care funcționau ca niște transformatoare de curent.

Necesitatea perfecționării sistemului de iluminat electric a impulsionat căutarea de noi soluții pentru sistemele de alimentare a lămpilor electrice.

În demersul lor pentru realizarea unui sistem de iluminat electric performant, doi pionieri în perfecționarea bobinelor de inducție și utilizarea lor în iluminatul electric - Lucien Gaulard și John Gibbs - au continuat direcția deschisă de Iablocikov. La fel ca și Iablocikov, ei au folosit conexiunea serie a inductoarelor (considerate ca generatoare secundare de energie), ceea ce a permis extinderea transmiterii energiei la distanțe mai mari. Aplicațiile dezvoltate în 1884 au avut succes. A fost iluminat electric metrul londonez, apoi s-a construit linia Torino-Lanzo în Italia. În aceste aplicații s-au folosit lămpi Edison cu arc, cu alimentare de la generatoare de 2000 V, la frecvența de 133 Hz.

Gaulard și Gibbs considerau că prin cuplarea lămpilor cu arc la secundarul inductoarelor se va reduce influența conectării acestora asupra curentului din bobina primară. Însă, conexiunea fiind în serie, acest efect nu a putut fi evidențiat. De asemenea, au constatat că la cuplarea individuală sau în grup a lămpilor, apăreau curenți mari și variații de tensiune care periclita funcționarea acestora.

5. SALTUL ÎN DEFINIREA STRUCTURII TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

Un prim salt s-a produs în anul 1882 când cei doi ingineri, Lucien Gaulard (1850-1888) și John Dixon Gibbs (1834-1912), au propus în Anglia un brevet pentru schema unui inductor care „alimenta un alt inductor”. Dispozitivul a fost prezentat în 1883 la demonstrația de la Westminster Aquarium în Londra și apoi la Expoziția din Torino, în 1884, sub denumirea “Gaulard and Gibbs secondary generator” [3], [4].

Muzeul Galilei din Florența conține un exemplar din primele transformatoare Gaulard - Gibbs fabricate în 1884 (Fig. 10).

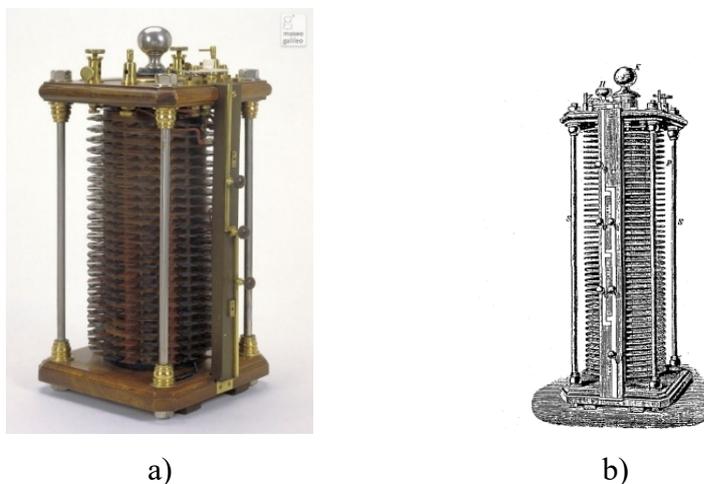


Fig. 10. Modele de transformator Gaulard-Gibbs: a) model expus în Muzeul Galilei din Florența. b) Model „de generator secundar” Gaulard and Gibbs prezentat în revista ETZ 1885, page 291.

Transformatorul Gaulard - Gibbs consta din două plăci de lemn, dispuse în partea de jos și de sus, care susțineau 4 bare de oțel, în care erau dispuse discuri de cupru, separate cu hârtie cerată. Discurile alternative erau conectate între ele, formând două bobine. Miezul central era constituit dintr-o bară glisantă din fier.

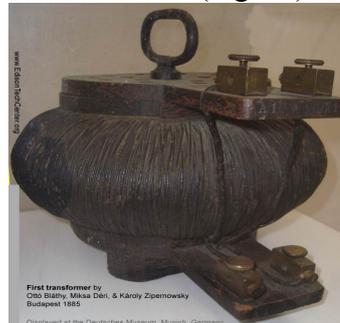
Saltul major însă este produs în anul 1884, în momentul în care trei tineri ingineri – Karl Zipernowski, Miska Déri, Otto Bláthy – de la Firma Ganz din Budapesta, participanți la Expoziția din Torino din 1884, au observat deficiențele majore ale sistemului “Gaulard and Gibbs secundar generator”: inductoarele aveau miezul feromagnetic în circuit deschis și pentru aplicația de iluminat cu lămpi cu arc electric se utiliza cuplarea în serie a bobinelor primare ale inductoarelor.

Cu aceste constatări, ei dezvoltă rapid o structură de inductor pe care o numesc “transformator” (denumire care s-a păstrat până astăzi), care are circuitul magnetic închis. Karl Zipernowski, Miska Déri, Otto Bláthy se grăbesc să înregistreze în anul 1885 brevetele pentru „îmbunătățirea distribuției energiei electrice și pentru perfecționarea aparatului de inducție care transformă parametrii curentului electric alternativ” [10], [11].

În același an, firma Ganz construiește primul transformator electric - un transformator monofazat”, tip “shell”, cu puterea nominală $S_n=1400$ VA, 120/72 V și 11.6/19.4 A, care funcționa la frecvența de 40 Hz. Miezul era confecționat din fire de fier (Fig. 11).



a)



b)

Fig. 11. Transformatorul electric Karl Zipernowski, Miska Déri, Otto Bláthy: a) modelul din Elektrotechnikai Múzeum, Budapesta; b) un exemplar de transformator existent la Deutsches Museum München

Șansa acestei invenții de a fi recunoscută pe plan internațional a fost participarea la Expoziția Națională de la Budapesta din 1885. La această expoziție, a fost prezentată o instalație de iluminat care folosea o mașină electrică generatoare de 1350 V, care producea curent electric alternativ la frecvența de 70 Hz. Tensiunea era redusă prin utilizarea a 75 de transformatoare “shell” care alimentau 1067 lămpi tip Edison pentru iluminarea expoziției. Funcționarea instalației pe toată perioada expoziției (din mai până în noiembrie 1885) a demonstrat valabilitatea soluției propuse.

Merită subliniate contribuțiile celor trei ingineri:

- a) au dezvoltat un transformator cu miez magnetic închis;
- b) au eliminat conectarea în serie a transformatoarelor pentru alimentarea cu energie electrică, pe linia principală de alimentare fiind utilizată legarea în paralel a transformatoarelor;
- c) au folosit rapoarte de transformare adecvate pentru a separa rețeaua de alimentare de înaltă tensiune (1400 V-2000 V) de rețeaua consumatorilor (100 V).

Miezul de fier cu circuit închis determina scăderea curentului de magnetizare, a reactanței de scăpări, a pierderilor în cupru și corespunzător a temperaturii în înfășurări și în izolație, ceea ce corespundea cu creșterea semnificativă a randamentului sistemului.

S-a demonstrat astfel rolul important al transformatorului, plasat între generator și receptoarele electrice: transformatorul este un echipament care funcționează pe baza

fenomenului de inducție electromagnetică, având rolul de a converti curentul din partea de înaltă tensiune (care poate fi condus mai ușor și cu puține pierderi la mari distanțe) în curent la o tensiune mai joasă (nepericuloasă pentru om), în vederea alimentării becurilor electrice.

Sistemul de alimentare propus utiliza conectarea în paralel a transformatoarelor. Se oferea o schemă prin care era posibilă reglarea sarcinii consumatorilor cuplați la un transformator, independent de sarcina cuplată la celelalte transformatoare legate în paralel.

6. CONCLUZII

Conceperea transformatorului electric are o lungă istorie. Variantele constructive primitive realizate începând cu anii 1830 până în 1885 au fost dezvoltate prin strădania cercetătorilor de a experimenta și elucida fenomenele care au loc în cadrul noului domeniu, care se afirma: electromagnetismul.

Primele aplicații care au contribuit la conceperea și definitivarea structurii transformatorului electric au fost inductoarele pentru descărcări electrice și iluminatul electric.

Prin adaosul de cunoaștere științifică și tehnică, probate de aplicații practice, s-a ajuns la obținerea structurii actuale de transformator electric, cu rolul principal de modificare corespunzătoare a tensiunii și curentului electric pentru transmiterea eficientă a energiei electrice. Apoi funcțiunile transformatorului s-au diversificat.

Transformatorul electric nu poate fi considerat ca opera unui singur inventator – reprezintă opera a numeroși oameni de știință, ingineri și tehnicieni care au adus aportul lor în realizarea acestui echipament de neînlocuit azi în mai toate aplicațiile electrice și electronice.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. F. Uppenborn, *Histoire des transformateurs*, Librairie Polytechnique, Baudry et Cie., Paris, 1888, pp. 39-41.
2. J.A. Fleming, *The alternate current transformer*, The Electrician, London, **2**, 1894.
3. Halacsy, G.H. von Fuchs, *Transformer invented 75 years ago*, Electrical Engineering, **80**, 6, pp. 404-407, 1961.
4. S. Jeszenszky, *History of Transformers*, IEEE Power Engineering Review, **16**, 12, pp. 9-12, 1996.
5. E. Cavicchi, *Nineteenth-century developments in coiled instruments and experiences with electromagnetic induction*, Annals of Science, **63**, 3, pp. 319-361, 2006.
6. E. Cavicchi, *Charles Grafton Page's Experiment with a spiral conductor*, Technology and culture, **49**, 4, pp. 884-907, 2008.
7. ***Smithsonian Institute Archives, <https://siarchives.si.edu/>
8. L. de Andrade, T.P. de Leão, *A brief history of direct current in electrical power systems*, Third IEEE History of Electro-technology Conference (HISTELCON), Pavia, Italy, pp. 1-6, 2012.
9. R.D. Barnett, *Induction motors: Early development*, IEEE Power Energy Mag., **20**, 1, pp. 90-98, 2022.
10. Karl Zipernowsky, Max Déri, *Improvements in distributing electricity and apparatus therefor*, English Patent 3379, Mar. 16, 1885.
11. Karl Zipernowsky, Max Déri, O.T. Bláthy, *Improvements in Induction Apparatus for Transforming Electric Currents*, English Patent No. 5201, U.S. Patent No. 352,105.