

Marek Kowalczewski, Wojciech Mysiński
PKP Energetyka, Politechnika Krakowska

HISTORIA ROZWOJU TRANSFORMATORÓW TOROIDALNYCH

HISTORY OF TOROIDAL TRANSFORMERS

Streszczenie: W artykule omówiono historię transformatorów toroidalnych, od odkrycia Faradaya w 1831 r. po toroidalne transformatory produkowane przez firmę Ganz i toroidalnego transformatora do zgrzewania oporowego Elihu Thomsona.

Abstract: This article discusses the history of toroidal transformers, from Faraday's discovery in 1831 to toroidal transformers produced by Ganz company and Elihu Thomson's toroidal transformer for resistance welding.

Słowa kluczowe: cewka Faradaya, transformator toroidalny, zgrzewanie oporowe

Keywords: Faraday's ring coil, toroidal transformer, resistance welding

1. Wstęp

Jednym z milowych kroków Drugiej Rewolucji Przemysłowej, było odkrycie tzw. stosu Volty przez Alessandro Volty w 1800 r. i odkrycie zjawiska indukcji elektromagnetycznej przez Michaela Faradaya w 1831 r. Pozwoliło to wielu innym badaczom i odkrywcom znacznie przyspieszyć proces tworzenia industrialnych rozwiązań w elektrotechnicznych technologiach, które zrewolucjonizowały świat.

Liczne eksperymenty Faradaya nad indukcją elektromagnetyczną (Faraday nazywał to jako „elektryczność z magnetyzmu” – „Electricity from Magnetism”), które przeprowadzał od 1821 r. wykorzystując napięcie stałe i różne konfiguracje cewek powietrznych nie przynosiły spodziewanych efektów. Dopiero 29 sierpnia 1831 r. kiedy Faraday zastosował toroidalny rdzeń z drutu żelaznego i nawinięte na nim kilka uzwojeń z drutu miedzianego (rys. 1), pozwoliło mu zauważyć, że przy podłączaniu i odłączaniu napięcia stałego do pierwszego uzwojenia - galwanometr podłączony do drugiego uzwojenia wychyla się. Faraday nie znał jeszcze wtedy takich zjawisk jak przenikalność magnetyczna, sprzężenie magnetyczne, indukcyjność rozproszenia. Dziś już wiemy, że to te właśnie zjawiska w uzwojeniach nawiniętych na toroidalnym rdzeniu pozwoliły w końcu po licznych eksperymentach Faradaya odkryć zjawisko indukcji elektromagnetycznej. To właśnie toroidalny rdzeń zapewnia największe sprzężenie magnetyczne i najmniejsza indukcyjność rozproszenia, które są odpowiedzialne za transformację napięcia i prądu w transforma-

torach. Faraday nie dysponował w tym czasie źródłem napięcia przemiennego, więc do pełnej transformacji napięcia i prądu nie dochodziło, ale w stanach nieustalonych układ ten zachowywał się jak najbardziej poprawnie i to pozwoliło na odkrycie zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Doświadczenie to zostało praktycznie wykorzystane w transformatorach ponad 50 lat później.

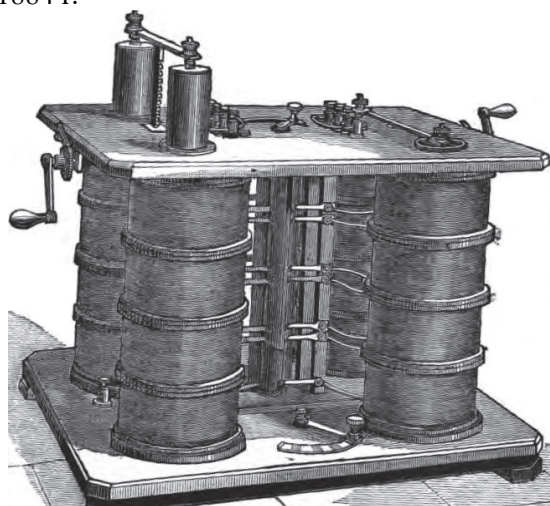


Rys.1. Pierwszy transformator toroidalny wykonany przez Michaela Faradaya, 1831 [7]

2. Toroidalne transformatory firmy Ganz

Pierwszym komercyjnym transformatorem, był transformator opracowany w 1882 r. przez Gaularda i Gibbsa nazywany przez nich „wtórnym generatorem” (rys. 2). Podstawowe parametry tego transformatora to: przekładnia 1:1, napięcie/prąd wejściowy 1500 V/11.3 A, sprawność

w zależności od obciążenia (63.5-87) % [1]. Transformator ten miał rdzeń otwarty wykonany z wiązki drutów żelaznych. Powodowało to dużą zmienność napięcia wyjściowego i potrzebna była ręczna regulacja dzięki ruchomym częściom rdzenia. Na wynalazek ten uzyskali patent brytyjski nr 4362, który później stracili po wniosku Ferrantiego. Uznano, że jest to rozwiązanie oparte o patent Jabłoczkowa [4]. Jako źródło napięcia przemiennego wykorzystali prądnice Siemens a uzwojenia pierwotne tych transformatorów były łączone szeregowo z prądnicą co dodatkowo pogarszało parametry wyjściowe. Transformator ten był pokazany na wystawie w Londynie w 1883 r. i Turynie w 1884 r.

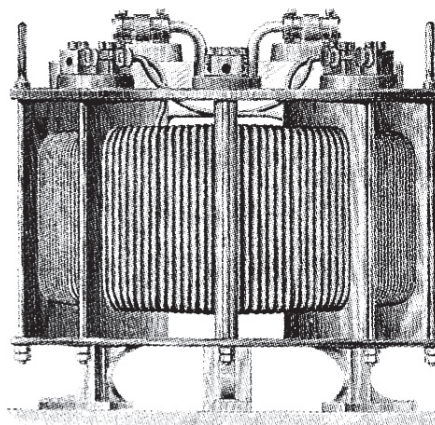


Rys. 2. Pierwszy komercyjny transformator (15 kW) z 1882 r. Gaularda i Gibbsa [1]

Trzej węgierscy inżynierowie z firmy Ganz: Otto Titus Blathy, Miksa Deri oraz Karoly Ziperowsky, odwiedzili tę wystawę w Turynie, na której zapoznali się z konstrukcją wtórnych generatorów Gaularda i Gibbsa. Pozwolili sobie nawet na krytyczne uwagi dotyczące szeregowego połączenia uzwojeń pierwotnych transformatora w układzie przesyłowym i skrytykowali zastosowanie w tych transformatorach otwartego rdzenia magnetycznego. Gaulard zapytany przez Blathy'ego, dlaczego nie zastosował zamkniętego obwodu magnetycznego odpowiedział, że byłoby to szkodliwe i nieekonomiczne [2].

Po powrocie z wystawy Ziperowsky, Deri i Blathy zbudowali kilka prototypów jednofazowych transformatorów toroidalnych, które radykalnie różniły się od konstrukcji Gaularda i Gibbsa. Wykorzystali oni rdzenie toroidalne, czyli rdzenie o zamkniętych obwodach magne-

tycznych i o uzwojeniach pierwotnych równolegle połączonych z prądnicą. Dodatkowo przekładnia tych transformatorów była obniżająca napięcie. Pierwszy transformator z 16 września 1884 miał następujące parametry: 120/72 V, 11.6/19.4 A, 1400 W, 40 Hz [3]. Dzięki takiemu rozwiązaniu ich transformator zapewniał największe sprzężenie i najmniejsze rozproszenie magnetyczne, co znacznie poprawiało sprawność w porównaniu z transformatorem Gaularda i Gibbsa (patrz: tabela 1).



Rys. 3. Toroidalny transformator (7.5kW) firmy Ganz z 1885 r. [2]

Tabela 1. Porównanie parametrów transformatorów toroidalnych

toroidalne transformatory firmy Ganz 1885 r. [2]		Transformator toroidalny 2018 r. (obliczenia własne)	
moc [kW]	sprawność [%]	masa [kg]	masa [kg]
1.87	92.5	70	11
3.75	94.5	110	14
7.5	95.5	175	21
15	96.8	290	39

Transformatory tego typu zostały zainstalowane 1 maja 1885 roku na wystawie przemysłowej w Budapeszcie i stworzyły one rozbudowaną sieć zasilającą. Sieć ta zasilana była z prądnicy o napięciu 1350 V, zbudowanej według patentu Ziperowsky'ego. Napięcie o częstotliwości ok. 70 Hz było transformowane przez 75 sztuk równolegle połączonych toroidalnych transformatorów płaszczowych o wzmocnionym rdzeniu w celu zmniejszenia strat mocy, zasilających 1200 żarówek [2].

A była to pierwsza sieć elektroenergetyczna z transformatorami pracującymi w układzie równoległym. Ten system Deri-Blathy-Ziperowsky, uzyskał ochronę patentową we Francji, Włoszech i Austro-Węgrzech. Był on znacznie

doskonalszy od systemu Gaularda i Gibbsa i z tego powodu wyparł go w wielu zrealizowanych wcześniej inwestycjach, np. w Tours i Tivoli [4].

Firma Ganz zaproponowała całą serię transformatorów toroidalnych. Transformatory te były wykonywane do ok. 1890 r. w czterech wymiarach o napięciach uzwojenia pierwotnego 900 V, 1800 V, 2700 V oraz 3600 V. Napięcie wtórne było równe 105 V dla zasilania lamp żarowych oraz 52 V dla zasilania lamp łukowych. Główne dane transformatorów są podane w tabeli 1 [2].

W tabeli 2 przedstawione są bardziej szczegółowe dane transformatora toroidalnego firmy Ganz o mocy 7500 W [2]. Ówczesne transformatory nie wykorzystywały specjalistycznych materiałów magnetycznych czy izolacyjnych i ich trwałość nie była wysoka, i wynosiła ona od roku do kilku lat.

Tabela 2. Porównanie parametrów transformatorów 7500 W z 1885 i 2018		
transformator toroidalny firmy Ganz z 1885 r. [2]		Transformator toroidalny z 2018 r. (obliczenia własne)
Parametr	Wartość	Wartość
Napięcie pierwotne [V]	1926	1926
Napięcie wtórne [V]	85	85
częstotliwość [Hz]	42.5	50
Pole powierzchni przekroju rdzenia [cm ²]	130	53.6
Masa rdzenia [kg]	95	19
indukcja magnetyczna [T]	0.4	1.7
Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego	1080	940
Liczba zwojów uzwojenia wtórnego	60	43
Średnica drutu uzwojenia pierwotnego [mm]	1,8 (Cu)	1.2 (Al)
Średnica drutu uzwojenia wtórnego [mm]	2,6 (Cu)	5.5 (Al)
Rezystancja uzwojenia pierwotnego [Ω]	4,2	8.5
Rezystancja uzwojenia wtórnego [Ω]	0,0135	0.0171
masa miedzi [kg]	40(Cu)	2 (Al)
masa transformatora [kg]	175	21
sprawność [%]	95.5	95.6

Dzięki tej serii transformatorów toroidalnych firma Ganz została uznana za pierwszego na świecie masowego producenta transformatorów, wykonując ich do końca XIX stulecia ponad 10000 sztuk o różnych mocach i napięciach [2]. Ganz do 1887 r. zbudował i zainstalował 24 systemy elektroenergetyczne o łącznej mocy 3 MW. Największa instalacja z tej serii, o mocy

1500 kW, została zbudowana w 1886 r. w Rzymie [4].

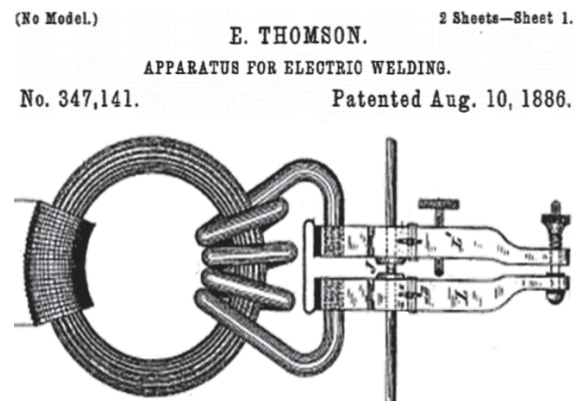
3. Toroidalny transformator do zgrzewania rezystancyjnego

Idee zgrzewania rezystancyjnego Elihu Thomson odkrył przypadkowo na początku 1877 r., przygotowując wykład na temat energii elektrycznej w Instytucie Franklina w Central High School w Filadelfii. Demonstrując studentom działanie cewki zapłonowej zwarł dwa przewody, które zespawały się ze sobą.

Pierwsza praktyczna demonstracja spawania przeprowadzono w Instytucie Franklina w Filadelfii w 1879 r., a produkcję pierwszych komercyjnych toroidalnych transformatorów do zgrzewania rezystancyjnego rozpoczęto w roku 1886, w firmie Thomson-Gibb [5]. Rozwiązanie to zostało opatentowane w 1886 r. (US347141).



Rys. 4. Elihu Thomson ze swoim transformatorem toroidalnym do zgrzewania rezystancyjnego [6]



Rys. 5. Patent US347141 Elihu Thomsona z roku 1886 [8]

Elihu Thomson był twórcą ponad 700 patentów, które miały istotny wpływ na poprawę i rozwój oświetlenia elektrycznego, konstrukcji lamp rentgenowskich, miernika elektrycznego, silników indukcyjnych, spawania elektrycznego i wiele innych zagadnień elektrycznych i mechanicznych. W 1892 r. jego firma Thomson-Houston Company połączyła się ze swoim rywalem, Edison Company of Schenectady, tworząc General Electric Company.

Literatura:

- [1]. Uppenborn F. J., *History of the Transformer*, New York 1889.
- [2]. Dąbrowski M., *Początki rozwoju transformatorów*, Poznań, Ośrodek Wydaw. Nauk., 2008.
- [3]. Asztalos P., *Centenary of the transformer*, Periodica Polytechnica, 1986.
- [4]. Królikowski L., *Rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydaw. Polskiej Akademii Nauk, 1986.
- [5]. Compton Karl T., *Biographical memoir of Elihu Thomson 1853-1937*.
- [6]. www.carolinacollisionequipment.com/automotive-resistance-spot-welding-history.
- [7]. <http://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/nSFvkPPCRdWQJ0hzSzzrB4A>
- [8]. <https://patents.google.com/patent/US347141A/en?q=US347141>.