



# BIULETYN

# TECHNICZNO - INFORMACYJNY



Zarządu Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich

Nr 5/2006 (34)

ISSN 1428-8966

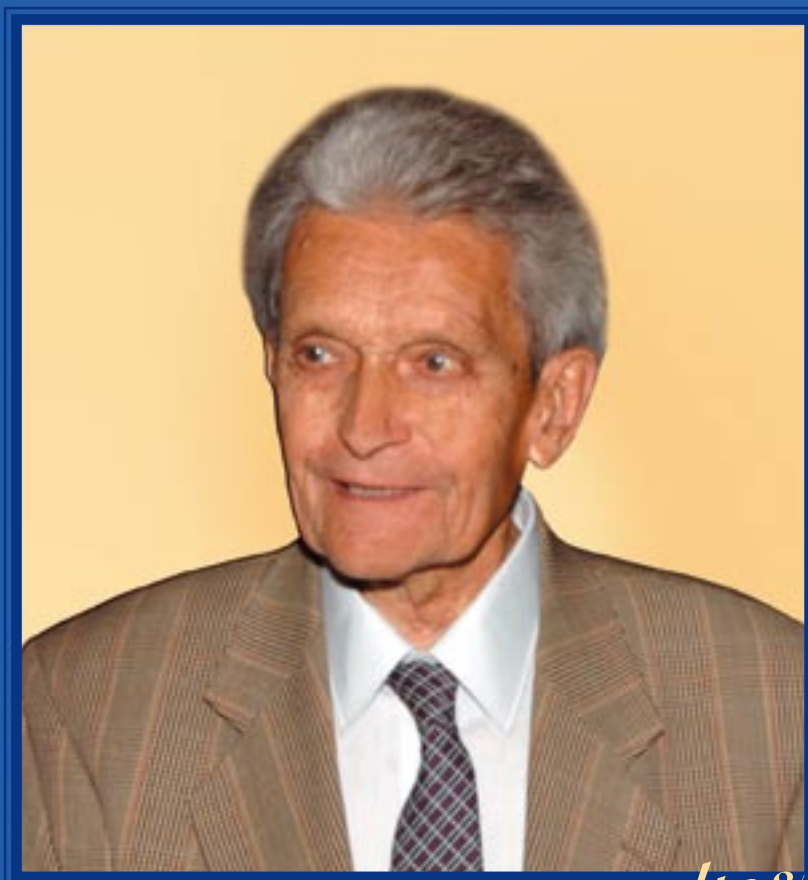
Październik 2006



**Seminarium rocznicowe:  
Od Elektrobudowy poprzez Eltę do ABB**



**95 rocznica urodzin i 55 lat pracy  
Zbigniewa Kopczyńskiego**



*Ad multos annos*



# STOWARZYSZENIE ELEKTRYKÓW POLSKICH

## Oddział Łódzki

90-007 Łódź, pl. Komuny Paryskiej 5a  
Dom Technika, IV p., pok. 409 i 404  
tel./fax (0 42) 630 94 74, 632 90 39  
e-mail: seplodz@onet.pl sep.lodz@neostrada.pl  
<http://sep.p.lodz.pl>

**świadczy wszelkiego rodzaju usługi we wszystkich dziedzinach elektryki:**

- u usługi techniczno-ekonomiczne w ramach Ośrodka Rzeczoznawstwa
- u kursy specjalistyczne w zakresie doskonalenia zawodowego
- u kursy przygotowawcze do egzaminów kwalifikacyjnych (wszystkie grupy)
- u szkolenia audytorów wewnętrznych systemów jakości (normy ISO 9000)
- u egzaminy kwalifikacyjne dla osób na stanowiskach EKSPLOATACJI I DOZORU w zakresach: elektroenergetycznym, cieplnym i gazowym
- u usługi marketingowe
- u prezentacje
- u reklamy w Biuletynie Techniczno-Informacyjnym OŁ SEP
- u rekomendacje dla wyrobów i usług branży elektrycznej
- u organizacja imprez naukowo-technicznych (konferencje, seminaria)

## OŚRODEK RZECZOZNAWSTWA OŁ SEP

*oferuje bogaty zakres usług technicznych i ekonomicznych:*

- ◀ Projekty techniczne i technologiczne
- ◀ Ekspertyzy i opinie
- ◀ Badania eksploatacyjne
- ◀ Badania techniczne urządzeń elektrycznych, elektronicznych i elektroenergetycznych
- ◀ Ocena zagrożeń i przyczyn wypadków powodowanych przez urządzenia elektryczne
- ◀ Ocena prototypów wyrobów, maszyn i urządzeń produkcyjnych
- ◀ Ocena usprawnień, pomysłów, projektów i wniosków racjonalizatorskich
- ◀ Opracowywanie projektów przepisów oraz instrukcji obsługi, eksploatacji, remontów i konserwacji
- ◀ Wykonywanie wszelkich pomiarów w zakresie elektryki
- ◀ Prowadzenie nadzorów inwestorskich i autorskich
- ◀ Wykonywanie ekspertyz o charakterze prac naukowo-badawczych
- ◀ Powadzenie stałych i okresowych obsług technicznych (konserwatorskich i serwisowych) oraz napraw
- ◀ Prowadzenie pośrednictwa handlowego (materiały, wyroby, maszyny, urządzenia i usługi)
- ◀ Odbiory jakościowe
- ◀ Pośrednictwo w zagospodarowywaniu rezerw mocy produkcyjnych, materiałów, maszyn i urządzeń
- ◀ Wyceny maszyn i urządzeń
- ◀ Ekspertyzy i naprawy sprzętu AGD i audio-video
- ◀ Tłumaczenia dokumentacji technicznej i literatury fachowej
- ◀ Doradztwo i ekspertyzy ekonomiczne
- ◀ Audyty i plany marketingowe
- ◀ Przekształcenia własnościowe
- ◀ Przygotowywanie wniosków koncesyjnych dla producentów i dystrybutorów energii

**OR SEP tel. (0 42) 632 90 39, 630 94 74**

**Pozycja i ranga SEP jest gwarancją najwyższej jakości, niezawodności i wiarygodności**

## Spis treści:

Praca pod kierunkiem Zbigniewa Kopczyńskiego w mojej pamięci .....	2
Praca w biurze konstrukcyjnym kierowanym przez Zbigniewa Kopczyńskiego .....	4
Autotransformator 160 MVA o przekładni 230/120 kV – od licencji do obecnej konstrukcji .....	6
Straty dodatkowe w transformatorach – od wzoru Kopczyńskiego do mechatroniki .....	9
Naukowe podstawy powstania i rozwoju transformatorów .....	16
Progresja strat w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów i możliwości modelowania .....	23
Konferencja VI „Transformatory Energetyczne i Specjalne – Rozwiązania, Funkcje, Trendy” Kazimierz Dolny, 11–13 października 2006 r .....	27
Referaty zgłoszone na VI Konferencję Naukowo-Techniczną „Transformatory Energetyczne i Specjalne” w Kazimierzu Dolnym w dniach 11–13 października 2006 roku .....	28

## Komitet Redakcyjny:

mgr inż. Mieczysław Balcerek – Sekretarz  
dr hab. inż. Andrzej Dębowski, prof. P.Ł.  
– Przewodniczący

mgr Anna Grabiszewska  
mgr inż. Lech Grzelak  
dr inż. Adam Ketner  
dr inż. Tomasz Kotlicki  
mgr inż. Jacek Kuczkowski  
prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński  
prof. dr inż. Władysław Pełczewski  
mgr inż. Krystyna Sitek  
dr inż. Józef Wiśniewski

Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za  
treść ogłoszeń. Zastrzegamy sobie prawo doko-  
nywania zmian redakcyjnych w zgłoszonych  
do druku artykułach.

## Redakcja:

Łódź, pl. Komuny Paryskiej 5a, pok. 404  
tel. 042-632-90-39, 042-630-94-74  
Skład: Alter  
tel. 042-676-45-10, 0605 725 073  
Druk: BiK  
Łódź, ul. Obywatelska 106/112  
tel. 042-676-07-78

Wydawca:

## Zarząd Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich

90-007 Łódź, pl. Komuny Paryskiej 5a

tel./fax (0-42) 630-94-74, 632-90-39

e-mail: seplodz@onet.pl sep.lodz@neostrada.pl

http://sep.p.lodz.pl

www.sep.lodz.wizytowka.pl

Konto: I Oddział KB SA w Łodzi 21 1500 1038 1210 3005 3357 0000

## Szanowni Państwo

Obecny numer Biuletynu ma charakter szczególny, gdyż wiąże się z 95-leciem urodzin seniora polskich elektryków, wybitnego konstruktora transformatorów, mgr inż. Zbigniewa Kopczyńskiego, wywodzącego się z rodziny wielce zasłużonej dla Łodzi.

Stryj Jubilata, inż. Walenty Kopczyński był współzałożycielem ELEKTROBUDOWY – fabryki w której przed II wojną światową rozpoczął pracę młody Zbigniew. W ciągu długich 55-ciu lat pracy zawodowej Jego losy były związane potem z fabryką Transformatorów i Aparatury Trakcyjnej ELTA, która w wyniku prywatyzacji przeszła na własność koncernu ABB i uległa restrukturyzacji.

Przez wiele lat Zbigniew Kopczyński był związany jako asystent, a następnie wykładowca z Katedrą Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej, kierowanej przez prof. dr h.c. Eugeniusza Jezierskiego, która przerodziła się z biegiem lat w obecny Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych.

Prezentujemy na wstępie barwne wspomnienie prof. dr hab. Michała Jabłońskiego z okresu młodości, kiedy podjął pracę w powojennej ELEKTROBUDOWIE pod kierunkiem Jubilata. Kolejne wspomnienie, autorstwa dr inż. Andrzeja Rosickiego, przenosi nas do lat 60. ubiegłego stulecia, kiedy nastąpił rozwój produkcji dużych transformatorów w ELCIE, a funkcję Głównego Konstruktora pełnił Zbigniew Kopczyński. Do pierwszego licencyjnego autotransformatora 160 MVA, zaprojektowanego w austriackiej firmie ELIN, wdrażanego do produkcji przez Jubilata i dalszej jego ewolucji, aż do chwili obecnej, nawiązuje praca mgr inż. Grzegorza Płuciennika i dr inż. Adama Ketnera. Kolejny autor, prof. dr hab. Janusz Turowski zaczynał swoją karierę naukową od „wzoru Kopczyńskiego” na straty dodatkowe w uzwojeniach. W swej obecnej pracy wspomina ten fakt oraz przedstawia możliwości programów komputerowych, powstałych pod jego kierunkiem w Politechnice Łódzkiej na użytek obliczania strat dodatkowych poza uzwojeniami. Kolejna praca, wykorzystująca źródła piśmiennicze, niemalże dzisiaj zapomniane, autorstwa prof. dr hab. Mirosława Dąbrowskiego, opisuje podstawy naukowe i wczesny okres rozwoju transformatorów, wart przypomnienia z okazji Jubileuszu.

Numer spina artykuł niżej podpisanego, w którym wykorzystano teorię modelowania do wyjaśnienia progresji strat w stalowych częściach konstrukcyjnych wraz ze wzrostem mocy jednostki, ze wskazaniem na możliwość zastosowania zasad modelowania fizycznego w obliczeniach komputerowych pół rozproszenia w transformatorach.

Wspomniane prace dedykowane Zb. Kopczyńskiemu są wyrazem wdzięczności środowiska naukowego i technicznego za Jego dokonania zawodowe i postawę życiową, nacechowaną życzliwością w stosunku do współpracowników. Dołączamy do nich nasze najszersze życzenia dla Dostojnego Jubilata, aby dopisywało Mu zdrowie, dobre samopoczucie, abyśmy odczuwali nadal Jego aktywną obecność w naszej Rodzinie Transformatorowej.

Kazimierz Zakrzewski

Michał Jabłoński

## Praca pod kierunkiem Zbigniewa Kopczyńskiego w mojej pamięci

Nasz obecny senior, Zbigniew Kopczyński, syn Stanisława, urodzony w 1911 r., był młodym chłopcem, gdy jego stryj Walenty policzył, zaprojektował i zrealizował w zaprzyjaźnionej firmie elektromaszynowej Braci Jaroszyńskich w Łodzi pierwsze polskie – bez licencji zagranicznej – transformatory suche, a następnie olejowe.

To przesądziło o losie i karierze życiowej młodego człowieka. Walenty był inżynierem mechanikiem o dużych uzdolnieniach w kierunku elektrotechniki, a dzięki samokształceniu posiadał rozległą wiedzę w tym zakresie. Zbyszek wybrał od razu właściwą dziedzinę, po maturze zdał pomyślnie egzamin wstępny na Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej i zaczął na nim studia obierając specjalność konstrukcyjną. Ożenił się jeszcze jako student w 1932 r. Swą pracę dyplomową wykonał u znanego i cenionego profesora Maszyn Elektrycznych Konstantego Żurawskiego, zwanego przez studentów „Dziadem”. Zaprojektował transformator energetyczny 10 MVA. Jak na ówczesne warunki był to projekt dyplomowy bardzo poważny i odważny. Zbyszek pomyślnie obronił swą pracę w 1934 r. i dwa lata później zgodnie z zamierzeniem zaczął działać w rodzinnej firmie, *Elektrobudowie*, na stacji prób. Była to doskonała podbudowa dla jego rozwoju zawodowego. W przypadku transformatorów Zbyszka szczególnie interesowały straty dodatkowe, przede wszystkim obciążeniowe. Starannie analizował różnice między obliczeniem a wynikiem pomiaru na stacji prób, oraz obserwował wpływ temperatury na wartość strat dodatkowych. Wynikiem obserwacji były jego ciekawe artykuły na ten temat opublikowane w latach 1938 i 1939 w „Przeglądzie Elektrotechnicznym”. Staranne omówienie wspomnianych prac i przydatność techniczną opracowań i wzorów przeprowadził w swym artykule z okazji dzisiejszego Jubileuszu kol. prof. Janusz Turowski.

Wyraźnie widać jak ważna jest dla inżyniera konstruktora praca na stacji prób, szczególnie gdy inżynier ma tak dociekliwy umysł, oraz zmysł obserwacyjny, jak Zbyszek. Wspominając swój własny rozwój zawodowy muszę stwierdzić, że za wzorem Zbyszka doświadczenie zdobyte na stacji prób i w laboratoriach pozwoliło mi wiele uzyskać. Miało to szczególne znaczenie przy wyjaśnianiu nieoczekiwanych zjawisk.

Inżynier Zbigniew Kopczyński został przez profesora Eugeniusza Jezierskiego już w 1946 r. zaproszony do współpracy w Politechnice Łódzkiej. Był wtedy doświadczonym specjalistą o bogatej praktyce. Ćwiczenia, które prowadził współpracując z prof. Jezierskim budziły duże zainteresowanie. Jako student stawiałem go sobie za wzór



i marzyłem: „Takim inżynierem chciałbym być, gdy skończę studia. Jestem przecież tylko o 9 lat od niego młodszy!”.

Kopczyński jako główny inżynier w fabryce imponował niezwykłą wprost umiejętnością. Każdego dnia robił obchód wszystkich stanowisk pracy konstruktorów, a później poszczególnych działów wytwórni – nawijalni, rdzeniowni, montażu, suszenia i prac wykończeniowych oraz stacji prób. Zmiana tematyki i podejścia do różnych problemów podczas obchodu, a następnie powrót do własnych zagadnień, następowały u Zbyszka bez chwili opóźnienia, a był to jeszcze czas, gdy *Elektrobudowa* produkowała i remontowała zarówno maszyny wirujące, jak transformatory różnych rodzajów i dławiki. Taka cecha charakterystyczna znamionuje idealnego kierownika technicznego. Jeszcze jako student odbywałem wraz ze Zdzisławem Pomykałskim praktykę specjalizacyjną w *Elektrobudowie*. Zbyszek opiekował się praktykantami osobiście. Poleciał nam obliczyć, zaprojektować i wykonać w takim zakresie, jak na to pozwolił czas trwania praktyki, niewielki transformator suchy zamówiony przez Politechnikę Łódzką dla laboratorium Miernictwa Elektrycznego. Umożliwiło nam to poznanie, jakie elementy sprawiają wykonawcom – robotnikom największe trudności. Osobista opieka nad praktykantami ogólnie lubianego głównego inżyniera pociągała za sobą życzliwość i pomoc pracujących obok robotników. Tę praktykę techniczną z przed wielu lat zachowałem dotychczas we wdzięcznej pamięci i starałem się na niej wzorować, gdy sam byłem opiekunem praktykantów.

Podczas pracy w fabryce *Elektrobudowa – M3*, już jako inżynier, zaobserwowałem, że Zbigniew nie narzucał podwładnym swojej koncepcji rozwiązania, ani nie lekcewał pomysłami swych inżynierów i techników, dbał jedynie o to, by nie zawierały błędów, nie powodowały kłopotów

wykonawczych lub montażowych i były oszczędne. Stosował więc w praktyce piękną zasadę: „Niech kwitną wszystkie kwiaty”.

Pod względem planowania i organizacji pracy oraz obowiązkowości Zbyszek, pomimo pozornego spokoju i ugodowości, był jednak twardy i nieustępliwy. Przykładu tego doświadczyłem na sobie. Pracując po dyplomie na pólacie w fabryce zostałem w pewnym okresie przydzielony przez Zbyszka jako współpracownik do pani inż. Albersztein, doświadczonej specjalistki w zakresie maszyn indukcyjnych. Byłem z tego zadania bardzo zadowolony, wykorzystywałem bowiem wiedzę zdobytą w PŁ w zakresie maszyn wirujących. Pewnego dnia jednak szef poprosił mnie i powiedział: „Dostaliśmy zamówienie od prof. Szpora z Politechniki Gdańskiej na jednofazowy transformator specjalny do prób zwarciovych aparatów elektrycznych. Parametry: suchy, 15 kV ± 3 x 5% / 110 – 220 – 440 – 880 V, moc typowa 0,5 MVA, napięcie zwarcia 3%. Jest to trudne, prestiżowe zamówienie. Zlecam panu jego wykonanie – obliczenie, projekt i wytyczne technologiczne oraz badania końcowe. Tu jestteczka ze szczegółami zamówienia. Sprawa bardzo pilna, proszę natychmiast przystąpić do pracy”.

Bez zwłoki zacząłem wykańczać obliczenie zaczęte dla pani Albersztein i oddałem jej te tematy, których jeszcze nie zacząłem. Jednak następnego dnia inż. Kopczyński podczas obchodu zapytał „Czy ma pan już koncepcję transformatora dla Gdańska?”, „Nie – odparłem – bo wykańczam i oddaję najpierw robotę zaczęłą dla pani Albersztein”. Na to szef: „Polecenie, które panu dałem jest bardzo wyraźne, powinien pan obliczenia silnika oddać w takim stanie, w jakim w danej chwili były i natychmiast zacząć projek-



tować transformator zwarciovych. Jeśli jutro nie będę pana widział na stanowisku przydesce kreślarskiej, to marny pański los !!!”. Położyłem uszy po sobie i następnego dnia podczas obchodu przedstawiłem wstępną koncepcję rozwiązania. Po

paru dniach intensywnej pracy szef powiedział: „Podoba mi się pańskie rozwiązanie, daję panu swobodę działania, proszę jednak zachować dużą ostrożność i nie szcędzić zapasów”. Była to największa pochwała, jaką mógł usłyszeć młody inżynier i jednocześnie ważna wskazówka.

Uważałem zawsze i uważam, że Zbyszek należał do godnych naśladowania wychowawców podporządkowanego mu personelu technicznego.

Jeśli jednak ktoś z tego personelu zrobił tzw. „knot”, zaniedbał swe obowiązki lub zlekceważył polecenie, Zbigniew nie popuszczał tego płazem. Był w fabryce



młodszy majster, niejaki Wilczek, bardzo pewny siebie, aktywista partyjny. Kiedyś zaniedbał swe obowiązki, poszedł na zebranie, a na podległych mu stanowiskach roboczych zostały popełnione poważne błędy. Zbyszek podczas obchodu stwierdził to z przerażeniem, oczywiście wydał odpowiednie polecenia. Gdy na klatce schodowej spotkał powracającego z zebrania Wilczka, zaczął na niego krzyczeć, strasznie zbeształ, stwierdził, że zaniedbanie ma cechy sabotażu gospodarczego i zgodnie z Boyem „brzydkie wyrazy powtarzał po kilka razy”.

Ruchliwa klatka schodowa w mgnieniu oka opustoszała. Wilczek zaniemówił, mienił się na twarzy i po poleceniu, aby biegiem wracał na swe stanowisko pracy zniknął również. Inż. Kopczyński poszedł w dalszy obchód, a na klatce schodowej pojawili się z powrotem świadkowie zdarzenia. „Kredą w kominie zapisać – mówili – Kopczyński głośno i szybko mówił, oraz brzydko przeklinał, coś niebywałego”. Nie uwierzyłbym, gdybym sam nie należał do tych świadków.

Zbyszek był jednak z natury pogodny i cieszący się radością życia – również pogoda bardzo go kochała. Przed wyborem terminu i miejsca spędzenia urlopu wszyscy znajomi pytali, gdzie i kiedy czyni to Zbyszek. Pogoda bowiem była wtedy murowana. Kiedyś jednak w biurze oddziału transformatorów przekształtnikowych inż. Jarosława Świdzkiego, do którego zostałem przydzielony w latach 50. ubiegłego stulecia, Zbyszek wyraźnie markotny powiedział: „Niedługo stuknie mi pięćdziesiątka. W mojej rodzinie mężczyźni rzadko przekraczają sześćdziesiąt lat. Ojciec zmarł w wieku 58 lat, stryj niewiele później. Tak więc mnie pozostało jeszcze nieco ponad 10 lat życia, a tematyka mojej pracy jest taka ciekawa i czeka ją poważny rozwój”.

Od tej chwili niedługo minie nie kilkanaście lat, lecz pół wieku.

Zbyszek w swej interesującej dziedzinie pracy nie tracił czasu, uzyskał wybitne osiągnięcia, nagrody i uznanie ludzkie. Wszyscy życzymy Mu dalszych wielu lat życia.

„Oby się tacy na kamieniu rodzili” – **Ad multos annos drogi Zbigniewie.**

**Prof. dr hab. inż. Michał Jabłoński**  
emerytowany profesor  
Instytutu Mechatroniki i Systemów Informatycznych  
Politechniki Łódzkiej

Andrzej Rosicki

## Praca w biurze konstrukcyjnym kierowanym przez Zbigniewa Kopczyńskiego

Po skończeniu studiów pierwszego stopnia (inżynierskich) w 1953 roku prof. Pomykalski zatrudnił mnie w Katedrze Miernictwa Elektrycznego w charakterze asystenta. Jednocześnie studiowałem na drugim stopniu (magisterskim), który ukończyłem w roku 1956. Żona pracowała w szkole jako nauczycielka. Gdy przyszła na świat córka, obydwie pensje przestały wystarczać na utrzymanie. Zacząłem poszukiwać dodatkowej pracy równoległe do zatrudnienia na Politechniki. Myślałem o biurach projektowych, ale któregoś wiosennego dnia, na kortach w parku Poniatowskiego spotkałem pana Kopczyńskiego, który dowiedział się (znał moich rodziców), że poszukuję pracy i wprost z kortów zaprowadził mnie do fabryki transformatorów M3 na ul. Kopernika do głównego inżyniera, pana Krzywańskiego. Tak to zostałem zatrudniony w tej fabryce od 1 lipca 1957 roku. Miałem pracować w projektowanym laboratorium. Tymczasem zostałem przydzielony do biura konstrukcyjnego, którego szefem był pan inż. Kopczyński. Początkowo nie miałem konkretnego przydziału do określonej pracowni biura. Byłem do specjalnych poruczeń.

Jak to często bywa, tymczasowość przeradza się w „stałość”. Budowa laboratorium na Kopernika stała się nieaktualna, gdyż przygotowano już projekt budowy nowej fabryki transformatorów przy ulicy Aleksandrowskiej, gdzie miało powstać nowoczesne Laboratorium Wysokich Napięć, którego organizację powierzono prof. Michałowi Jabłońskiemu.

Gdy zachorował inż. Sowiński, który projektował transformatory jeszcze przed wojną u pana Walentego Kopczyńskiego, pan Zbigniew Kopczyński zlecił mi jego zastępstwo. Kończyłem, więc projekt transformatora wieloprzepustowego dla fabrycznej stacji prób.

Zacząło powstawać biuro konstrukcyjne dla nowej fabryki, później nazwanej ELTA. Kierownik pracowni transformatorów 110 kV przeszedł do tego biura, a ja zająłem jego miejsce.

Tak to pan Kopczyński spowodował, że zostałem konstruktorem transformatorów.

Ruszyła produkcja w nowej ELCIE, do której włączono również, jako jeden z zakładów, fabrykę M3 z ul. Kopernika. Pan inż. Kopczyński dalej był głównym konstruktorem połączonych już biur ze starej i nowej fabryki. Na transformatory dużych mocy powyżej 100 MVA zakupiono licencję w Austrii w znanej, światowej firmie ELIN.

Znałem niemiecki. Wyjechałem na praktykę do ELINA i po powrocie pan Kopczyński powierzył mi opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej transformatorów licencyjnych oraz nadzór nad wdrażaniem ich do produkcji.

Następnie powstała pracownia transformatorów dużych mocy i na wysokie napięcia. Pan Kopczyński powierzył mi jej kierownictwo. Zostały opracowane własne konstrukcje transformatorów 240 MVA najpierw na 240 kV (za którą dostaliśmy wraz z panem Kopczyńskim zespołową nagrodę państwową II stopnia), a następnie na 420 kV.

Byłem konstruktorem transformatorów ponad 30 lat. Większość tego czasu pod kierownictwem i nadzorem pana Kopczyńskiego. Był on naszym doskonałym nauczycielem. Nie zostawiał nigdy bez pomocy, gdy tego potrzebowaliśmy. Pozostawiał nam wiele swobody. Stanowczo tylko wymagał stosowania jednolitego systemu uzębowań wzmacniających kadź. Dbał, by transformatory projektowane przez różnych konstruktorów, ale wychodzące z jednej fabryki miały podobny wygląd zewnętrzny.

Po Jego przejściu na emeryturę korzystałem również z powodzeniem, z przekazanych doświadczeń w kierowaniu większym zespołem ludzi.

Pan Kopczyński uczył samodzielności młodych pracowników od samego początku ich pracy. Jako przykład przytoczę niżej zadanie, jakie powierzył mi, gdy byłem młodym konstruktorem o niewielkim doświadczeniu szczególnie w wykrywaniu nieprawidłowości pracy transformatorów.

Koniec lat pięćdziesiątych. Byłem wtedy kierownikiem pracowni transformatorów 110 kV w biurze konstrukcyjnym fabryki transformatorów M3 przy ul. Kopernika. Głównym konstruktorem był pan inż. Kopczyński, głównym inżynierem pan inż. Augustyniak (ukończył wieczorowe studia inżynierskie na Politechnice Łódzkiej), a dyrektorem pan Jan Kotynia. Otrzymał on stopień inżyniera zawodowego w NOT. W tym czasie można było otrzymywać stopień inżyniera bez ukończenia studiów, jedynie na podstawie egzaminów w NOT. Ukończył on później studia zaoczne z ekonomii na Uniwersytecie Łódzkim. Znany był z tego, że nie tolerował sprzeciwu niezależnie od tego czy miał rację, czy nie.

Kilka lat przedtem w M3 był remontowany transformator 40 MVA na 110 kV produkcji AEG. Uległ on uszkodzeniom mechanicznym w czasie wojny, podczas bombardowania Szczecina. W latach tych nie istniał jeszcze „Energomiar”. Z upoważnienia energetyki transformatory w M3 odbierane były przez Politechnikę Łódzką. Odbioru dokonywał prof. Michał Jabłoński i prof. Tadeusz Koter.

W trakcie próby stanu jałowego słyszalne było buczenie. Obowiązująca wtedy Polska Norma PN/E 06040 ustanawiała jedynie, że buczenie nie powinno być zbyt wysokie. Poziomu nie określała, gdyż pomiaru szumów jeszcze nie

wykonywano. W przypadku tego transformatora poziomu jego buczenia nie zakwestionowano. Transformator po pozytywnych próbach odbiorczych został wysłany do kombinatu chemicznego w Oświęcimiu, gdzie został postawiony jako rezerwowo.

W końcu lat pięćdziesiątych główny transformator zasilający w energię kombinat chemiczny w Oświęcimiu uległ uszkodzeniu.

Opisywany wyżej transformator rezerwowo 40 MVA, przed włączeniem go do ruchu, został poddany obowiązującym próbom. „Energopomiar”, który powstał w międzyczasie i między innymi badał transformatory, zakwestionował poziom buczenia. Powołano komisję, do której wchodziła również Politechnika Łódzka. Komisja potwierdziła wysoki poziom buczenia i zaleciła dokonania przeglądu wewnętrznego. Władze kombinatu zwróciły się do M3 o dokonanie przeglądu transformatora i usunięcia buczenia. Dyrektor Kotynia odmówił, gdyż minął okres gwarancji. Kombinat stał. Minister przemysłu chemicznego zwrócił się do ministra przemysłu maszynowego o nakazanie dokonania przeglądu i naprawy. Minister przemysłu nakazał dyrektorowi Kotyni wysłanie specjalisty i usunięcie usterki. Dyrektor Kotynia nakaz przekazał głównemu inżynierowi, a ten głównemu konstruktorowi.

Pan Kopczyński wezwał mnie i polecił natychmiastowy wyjazd do Oświęcimia. Poinformował mnie, że transformator ten miał jarzma rdzenia połączone z kolumnami „na styk” i że buczenie prawdopodobnie powodowane jest przez rdzeń. W M3 pakiety jarzm splatane były z pakietami kolumn, więc nie było tu doświadczenia z jarzmami „na styk”. Poradził, by przed wyjazdem pójść do pana prof. Eugeniusza Jezierskiego, który pracował przed wojną w fabryce transformatorów w Żychlinie. Tam produkowano rdzenie „na styk”, tak jak w AEG, więc na pewno otrzymam dobre wskazówki. Zwróciłem się o pomoc do pani Ali wtedy jeszcze, Bronakowskiej (później wyszła za mąż za prof. Macieja Kozłowskiego), która pracowała wtedy w Katedrze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów. Profesor przyjął mnie w jej asyście, lecz patrząc do kalendarza wyznaczył termin konsultacji za kilka dni. A miałem jechać do Oświęcimia tego wieczoru. Pani Alicja Bronakowska zaproponowała spotkanie z prof. Jabłońskim w przerwie jego wykładu.

Prof. Jabłoński przyjął mnie bardzo serdecznie i poradził, bym sprawdził czy poszczególne pakiety jarzma są połączone potencjalnie z odpowiednimi pakietami kolumn, bo jeśli nie, to między nimi mogą następować wyładowania niepełne, które wywołują owo buczenie. Ponieważ M3 produkuje jarzma zaplatane, więc prawdopodobnie podczas remontu wyjęto owe połączenia i potem ich nie założono. Poradził, bym połączył odpowiednie pakiety jarzma i kolumny za pomocą rezystorów.

Pojechałem. Miałem przesiadkę w Krakowie. Przyjechałem do Krakowa późnym wieczorem, a pociąg do Oświęcimia miałem dopiero wczesnym rankiem. Siedziałem w restauracji dworcowej. Dobrze po północy wpadła do restauracji duża grupa artystów z Piwnicy Pod Baranami pod przewodnictwem Piotрка Skrzyneckiego, z którym chodziłem do jednej klasy w liceum. Przysiedli się do mojego stolika i towarzyszyli mi do odjazdu pociągu.

Usilnie namawiali do wypicia z nimi alkoholu, a ja przecież jechałem do pracy i to do wykonania ciężkiego zadania, jak dla mnie, młodego jeszcze inżyniera i dopiero co awansowanego na kierownika pracowni. Było to moje ostatnie spotkanie z Piotrem. Kelner powiedział mi, że „Piwnica” przychodzi bardzo często. Po zamknięciu restauracji w mieście przychodzą pić do dworcowej.

Przyjechałem do kombinatu. Na moje wielkie szczęście głównym energetykiem był ojciec kolegi z rocznika studiów na Politechnice. W kombinacie był warsztat remontowy, w którym stał już transformator. Wyjeliśmy go z kadzi. Faktycznie, jarzmo było „na styk” i pakiety jarzma nie miały połączenia potencjalnego z pakietami kolumn. Można było dostrzec nawet ślady opalenia wyładowaniami niepełnymi krawędzi blach na styku jarzma i kolumn, przedzielonych arkuszami preszpanu, który stanowił odizolowanie jarzma od kolumn. Powiedziałem szczerze, że mam zakaz mojego dyrektora podejmowania jakichkolwiek decyzji dotyczących wykonania prac przez fabrykę, bo transformator jest po gwarancji. Główny energetyk okazał przychylność i zgodził się na wykonanie wszystkich prac własnymi siłami. Prosił jedynie o nadzór z ELTY, gdyż w swym składzie nie miał specjalisty od transformatorów. Zgodziłem się, więc na przysłanie pracownika z fabryki na nadzór przy wykonywanej pracy. Zdecydowałem się na łączenie bezpośrednio pakietów jarzma z pakietami kolumn za pomocą taśmy z blachy miedzianej. Rezystory zalecane przez prof. Jabłońskiego były nieosiągalne w tym krótkim do dyspozycji czasie.

Spisaliśmy odpowiednią notatkę służbową. Wróciłem do Łodzi. Zdałem sprawozdanie mojemu szefowi, panu inż. Kopczyńskiemu. Przedstawiłem mu spisana notatkę. Pan Kopczyński zaakceptował spisana notatkę i pochwalił za wykonane zadanie, ale wezwał mnie do siebie też dyrektor Kotynia. Po przedstawieniu mu sprawy i notatki stwierdził, że nie wykonałem jego polecenia, bo zakazał mi podejmowania wszelkich zobowiązań ze strony fabryki. Nie wiem czy został przekonany po szczegółowym przedstawieniu sprawy i pojmowanej przeze mnie odpowiedzialności fabryki, mimo upływu okresu gwarancyjnego, czy też liczył się ze mną trochę bardziej ze względu na to, że pracowałem równoległe na Politechnice, dość, że zaakceptował podjęte zobowiązania.

Sądziłem, że na nadzór pojedzie do Oświęcimia ktoś z oddziału montażu lub kontroli technicznej. Dyrektor Kotynia stwierdził jednak, że skoro zacząłem ten „Wersal”, jak się wyraził, to i we własnym zakresie muszę go skończyć. W uzgodnieniu z panem inż. Kopczyńskim wysłany został na nadzór inż. Jędrzej Lelonkiewicz, konstruktor jeszcze młodszy ode mnie.

Po dokonaniu naprawy transformator został włączony do ruchu i pracował już bezbłędnie. Pan inż. Kopczyński uznał sprawę za załatwioną bardzo dobrze i uzyskaliśmy z inż. Lelonkiewiczem Jego uznanie za dobrze wykonane zadanie.

**Dr inż. Andrzej Rosiecki**  
emerytowany pracownik  
ABB Elta Sp. z o.o. w Łodzi

Grzegorz Płuciennik, Adam Ketner

## Autotransformator 160 MVA o przekładni 230/120 kV – od licencji do obecnej konstrukcji

### Streszczenie

W artykule krótko opisano drogę od licencji do obecnej konstrukcji autotransformatora 160 MVA o przekładni 230/120 kV. licencyjnego (1965 r.) i obecnie produkowanego (2004). Wskazano na niektóre nowe technologie zastosowane w jednostce obecnie produkowanej oraz zwrócono uwagę na zmianę wymagań dotyczących wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, a zwłaszcza izolacji międzyfazowej.

### 1. Wstęp

W połowie ubiegłego wieku stara fabryka transformatorów osiągnęła szczyt swoich możliwości. W roku 1958 zapada decyzja wybudowania nowej fabryki transformatorów w Łodzi. Dla przyspieszenia uruchomienia w niej produkcji obiektów większych mocy i wyższych napięć od produkowanych do tej pory w starej fabryce zakupiono licencję w austriackiej firmie ELIN. Licencja obejmowała dwa transformatory blokowe (150 MVA na 125 kV i 130 MVA na 245 kV) oraz autotransformator 160 MVA o przekładni 230(1±0,12)/120 V. Transformatorów blokowych wyprodukowano niewiele, a autotransformatorów o te mocy i przekładni – bardzo dużo; do tej pory wyprodukowano ich ponad 130.

Wdrażaniem licencji w zakresie dokumentacji technicznej kierował mgr inż. Zbigniew Kopczyński. Autotransformator licencyjny **slaby** dynamicznie, a poza tym, jego uzwojenia regulacyjne wymagały ochrony przeciwprzepięciowej. Zbigniew Kopczyński zainicjował wiele wspólnych prac fabryki i placówek naukowo-badawczych<sup>1</sup> dotyczących, między innymi, tych kwestii. Efektem tej współpracy były nowe własne konstrukcje transformatorów o jeszcze większych mocach i wyższych napięciach oraz udane modernizacje jednostek już budowanych [9, 10].

**Inżynier Senior** przestaje formalnie pracować w fabryce 1991 r.; często odwiedza fabrykę i **dogląda** produkcję. Szczególnie interesują Go autotransformatory, na które zapotrzebowanie jest nadal duże.

**Drogi Inżynierze Seniorze, życzymy Panu wiele, wiele lat tego „doglądania”.**

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka; Katedra Maszyn Elektrycznych i Transformatorów (obecnie Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych) oraz Katedra Wysokich Napięć, Instytut Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć (Warszawa) i Instytut Energetyki, Oddział Transformatorów w Łodzi.



Rys. 1. **Inżynier Senior** na wydziale produkcyjnym w fabryce (czerwiec 2006) [14]

W niniejszym artykule przedstawiono krótki opis drogi od licencji do obecnej konstrukcji autotransformatora ANAR3E 160000/220 PN.

### 2. Autotransformator RTdxP 125000/200 (licencja)

Autotransformator licencyjny RTdxP 125000/200 (rys.1) opisują następujące parametry:

Moc:	160/160/50 MVA
Napięcia:	230 (1±0,12)/120/10,5 kV
Układ połączeń:	YNa0d11
Napięcia zwarcia:	10/34/20%
Rodzaj chłodzenia:	OFAF
Straty obciążeniowe:	350 kW
Straty stanu ałowego	83 kW

Natomiast izolację jego uzwojeń opisują poniższe poziomy izolacji [1, 2, 3]:

• zacisk liniowy uzwojenia 230 kV	$[-/825/360]^2$
• zacisk liniowy uzwojenia 120 kV	$[-/550/230]^2$
• zacisk neutralny autotransformatora	$[-/550/230]$
• zacisk uzwojenia 10,5 kV	$[-/95/38]^3$

<sup>2</sup> do zacisków liniowych przykładano udary ucięte na grzbiecie, o wartości szczytowej o 15% większej od udarów pełnych.

<sup>3</sup> poziom izolacji jak dla uzwojenia na napięcie  $U_m = 17,5$  kV.





Rys. 2. Autotransformator RTdxP 125000/200 na stanowisku pracy

Isolacja główna i jarzmowa jednostki licencyjnej była wykonana przeważnie z papieru kablowego; układy takie cechuje duży współczynnik wypełnienia izolacją stałą i znaczna liczba kanałów olejowych. Uzwojenia nawijano przewodami w grubym oplocie także z papieru kablowego. Dlatego też jednostka licencyjna była **slaba** dynamicznie, zwłaszcza przy zwarciach doziemnych jednofazowych w sieci 110 kV. Poza tym, przepięcia piorunowe w obszarze uzwojeń regulacyjnych były tak duże, że konieczna była ich ochrona przeciwprzepięciowa. Ochronę tę stanowiły zaworowe ograniczniki przepięć zamocowane bezpośrednio na specjalnych i drogich przepustach uzwojenia 120 kV.

Kwestie te były rozważane w wielu pracach prowadzonych w fabryce i placówkach naukowo-badawczych. Ich rezultaty pomogły opracować zmodernizowany wariant omawianego autotransformatora [9, 10].

### 3. Autotransformator ANER3B 160000/220 PN

W roku 1984 wyprodukowano zmodernizowany autotransformator ANER3B 160000/220 PN.

Moc:	160/160/1,6 MVA
Napięcia:	230 (1±0,1)/120/15,75 kV
Układ połączeń:	YNa0yn0
Napięcia zwarcia:	10,21/13,47/7,72%
Rodzaj chłodzenia:	OFAF
Straty obciążeniowe:	325 kW
Straty stanu jałowego	70 kW

Natomiast izolację jego uzwojeń opisują poniższe poziomy izolacji [4]:

- zacisk liniowy uzwojenia 230 kV [-/850/360]<sup>4</sup>
- zacisk liniowy uzwojenia 120 kV [-/450/185]<sup>4</sup>
- zacisk neutralny autotransformatora [-/38]
- zacisk uzwojenia 15,75 kV [-/95/38]

<sup>4</sup> do zacisków liniowych przykładano udary ucięte na grzbiecie, o wartości szczytowej o 15% większej od udarów pełnych.

Podstawowym celem modernizacji było zapewnienie **dobrej** wytrzymałości zwarciowej. Uzyskano to dzięki zmianie konstrukcji uzwojeń i zastosowanie izolacji twardej. Zmiany konstrukcyjne, inne warunki eksploatacyjne i przepisy normalizacyjne [4] umożliwiły takie obniżenie przepięć w uzwojeniach regulacyjnych, że można było zrezygnować z ich ochrony przeciwprzepięciowej. Omawiany autotransformator ANER3B 160000/220 PN oraz warianty tego rozwiązania produkowano do roku 2004.

### 4. Autotransformator ANAR3F 160000/220 PN

Autotransformator obecnie produkowany (rys.3) opisują poniższe parametry:

Moc:	160/160/16 MVA
Przekładnia napięciowa:	230 (±10×1,00%)/120/10,5 kV
Napięcie zwarcia:	10/36/23 %
Układ połączeń:	YNa0d11
Chłodzenie:	ONAN/ONAF
Straty obciążeniowe:	285 kW
Straty stanu jałowego:	35 kW



Rys. 3. Autotransformator ANAR3F 160000/220 PN na stanowisku pracy

Zaś jego układ izolacyjny charakteryzują następujące wymagania dotyczące izolacji:

- zacisk liniowy uzwojenia 230 kV [650/850/(240)<sup>5</sup>]
- zacisk liniowy uzwojenia 120 kV [-/450/185]
- zacisk neutralny autotransformatora [-/38]
- zacisk liniowy uzwojenia 10,5 kV [-/95/38]<sup>6</sup>

Ponad to układ izolacyjny – w myśl przepisów [6] – ma być **wolny** od wyładowań niezupełnych i odporny na przepięcia dorywcze i naprężenia ciągłe podczas pracy. Poziomy izolacji zacisków liniowych uzwojenia 230 kV opisują teraz inne znormalizowane napięcia probiercze [6] i pomimo, że są one równoważne poziomom poprzednio omawianych autotransformatorów to wpływają, i to znacząco, na wymagania dotyczące izolacji międzyfazowej uzwojeń. Wymagania te wyznacza teraz udar probierczy łączeniowy zacisku liniowego 230 kV – SI = 650 kV. Udar ten stawia

<sup>5</sup> długotrwała próba napięciem indukowanym z pomiarami wyładowań niezupełnych – ACLD+PD.

<sup>6</sup> jak dla uzwojenia na napięcie  $U_m = 17,5$  kV.

izolacji międzyfazowej uzwojeń obecnej konstrukcji autotransformatora większe wymagania niż były w konstrukcji licencyjnej; dla uzwojenia 230 kV są one większe aż o 43%, a dla uzwojenia 120 kV – o 21%.

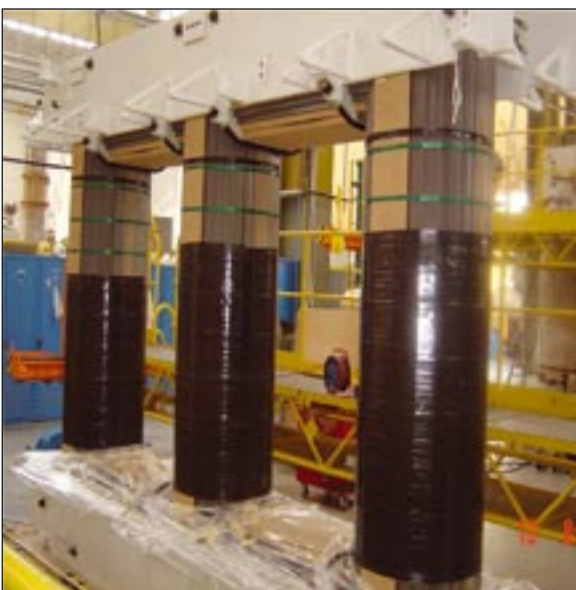
Obecną konstrukcję autotransformatora charakteryzują – w porównaniu z licencyjną – niższe, prawie o 25% straty całkowite oraz korzystniejsze, ponad 2-krotnie, relacje strat stanu jałowego i strat obciążeniowych, co ma duże znaczenie dla jednostek sieciowych w eksploatacji. Uzyskano to mimo większych wymagań stawianych układowi izolacyjnemu [6] oraz innego rodzaju chłodzenia (ONAN/ONAF) i spełnieniu warunku cichej pracy –  $\leq 84$  dB(A) [5].

Autorzy zwracają uwagę na niżej opisane kwestie.

a) Rdzeń obecnej konstrukcji autotransformatora złożono z blachy transformatorowej zimnowalcowanej o grubości 0,27 mm; jest to rdzeń jednoramowy. Blachy rdzenia zaplatano według systemu **step lap** pod kątem  $45^\circ$  [13]. Szczegóły tego systemu pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zaplatanie rdzenia według systemem **step lap**



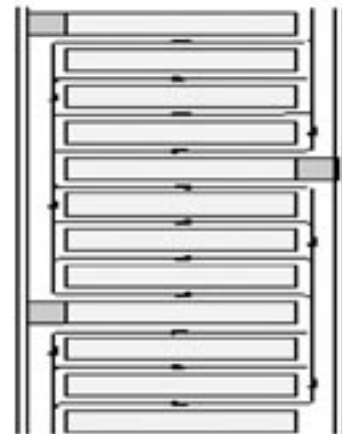
Rys. 5. Montaż asecondu na kolumnach rdzenia.

Kolumny rdzenia usztywnione zostały termoutwardzalnym materiałem o handlowej nazwie **asecond**. Oprócz wzmocnienia mechanicznego kolumny ma on jeszcze jedną ważną cechę; **asecond** jest również materiałem półprzewodzącym i doskonale ekranuje krawędzie pakietów rdzenia.

Podstawowym elementem nośnym rdzenia są belki górne i dolne połączone ze sobą za pomocą listew nośnych, wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej. Konstrukcja belek górnych, umożliwiła prasowanie jarzm za pomocą stalowych śrub ściągających zamocowanych w gniazdach belek. Niektóre szczegóły opisanych tu rozwiązań są widoczne na rysunku 5.

b) Uzwojenia szeregowe i wspólne omawianego autotransformatora mają budowę cewkową, natomiast uzwojenie wyrównawcze – śrubową. Uzwojenia te nawinięto przewodem o ciągłej transpozycji żył w izolacji emaliowanej w oplocie papierowym. Korzystny rozkład przepięć piorunowych w izolacji wzdłużnej uzwojeń zapewniły ekranujące zwoje wplatanie między zwoje robocze cewek [7]

Natomiast uzwojenie regulacyjne nawinięte jest jako dwutorowa wielozwojna śruba **Hitachi** przewodem pojedynczym w izolacji papierowej.



Rys. 6. Podsterowany przepływ oleju w uzwojeniach autotransformatora

W uzwojeniach szeregowym i wspólnym zastosowano *podsterowany przepływ oleju*; został on wymuszony przez bariery zamontowane w kanałach przyuzwojeniowych [8, 13]. Bariery te poprzez dławienie przepływu oleju w kanale osiowym, kierują jego przepływ przez kanały promieniowe. Szkic tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 6.

c) Wszelkie połączenia uzwojeń z zaciskami przepustów lub przełącznikiem zaczepek były wykonane z linek i przewodów miedzianych w izolacji papierowej, a miejsca ich połączeń były **zaprasowywane**. Powstałe podczas tego procesu wszelkie wypaski zaekranowane zostały papierem półprzewodzącym [13]. Połączenia te mocowane są w prespanowych trzymaczach.

#### 4. Podsumowanie

Obecną konstrukcję autotransformatora charakteryzują – w porównaniu z licencyjną – niższe, prawie o 25% straty

całkowite oraz korzystniejsze, ponad 2-krotnie, relacje strat stanu jałowego i strat obciążeniowych, co ma duże znaczenie dla jednostek sieciowych w eksploatacji. Uzyskano to mimo większych wymagań stawianych układowi izolacyjnemu (podano je w dodatku) oraz innego rodzaju chłodzenia (ONAN/ONAF) i spełnieniu warunku cichej pracy –  $\leq 84$  dB(A).

## 5. Literatura

- [1] PN-56/E-06040: Transformatory, Przepisy ogólne, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1956.
- [2] PN-63/E-04062: Transformatory, Próby wytrzymałości elektrycznej, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1963.
- [3] PN-69/E-06040: Transformatory, Wymagania ogólne i badania, Warszawa 1969.
- [4] PN-83/E-06040: Transformatory, Wymagania ogólne, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1983.
- [5] PN-EN 60076-1: Transformatory, Wymagania ogólne, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2001.
- [6] PN-EN 60076-3: Transformatory – Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- [7] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A.: Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa 1983.
- [8] Jeziński E.: Transformatory, WNT, Warszawa 1983 (rozdziały 12 i 13 opracowane przez Zygmunta Hastermana).
- [9] Jabłoński M.: Powstanie i rozwój fabryki transformatorów energetycznych w Łodzi, Przegląd Elektrotechniczny, LXXXI, nr 12/2005.
- [10] Kopczyński Z., Jelonkiewicz J.: Rozwój produkcji transformatorów dużej mocy w FTiAT ELTA Wiadomości Elektrotechniczne, LIII (1985), nr 11-12.
- [11] Płuciennik G., Ketner A.: Rozwój konstrukcji autotransformatorów 160 MVA o przekładni 230/120 kV w fabryce transformatorów w Łodzi, VI Konferencja Naukowo-techniczna „Transformatory energetyczne i specjalne”, Kazimierz Dolny, 11–13 października 2006.
- [12] Kadź olejowa transformatora mocy, wzór użytkowy RU 59822.
- [13] TrafoStar documentation, Materiały wewnętrzne ABB.
- [14] FLESZ, Magazyn wewnętrzny ABB nr 45 (145), lipiec-sierpień 2006.

**Mgr inż. Grzegorz Płuciennik**  
konstruktor

**ABB Sp. z o. o. Oddział w Łodzi**  
Zakład Transformatorów Mocy

**Dr inż. Adam Ketner**  
emerytowany pracownik  
ABB Elta Sp. z o. o.

Janusz Turowski

## Straty dodatkowe w transformatorach – od wzoru Kopczyńskiego do mechatroniki

### Życzenia

Kiedy wiosną 1946 r. wyładowano nas wśród przerażających ruin Warszawy z transportu repatriacyjnego, po sześciu latach deportacji sowieckiej z polskiego Kowla w stepy i tajgę syberyjską, spragniony nauki, szybko zorientowałem się, że podobnej masakry dokonali sowieccy i niemieccy najeźdźcy na inteligencji polskiej. Cały ciężar odbudowy z ruin kultury i techniki polskiej spadł na barki nielicznych ocalałych, wspaniałych przedwojennych inżynierów polskich. Cierpiąc powojenną biedę, szybko odtwarzali oni Uniwersytety i Politechniki. Towarzyszył im podziw i entuzjazm młodzieży akademickiej ściągającej z frontów, partyzantki, zsyłek i tułaczek całego świata.

Byli w różnym wieku – od przedwojennych studentów, po nieletnich niewolników sowchozowych. Wśród takich wspaniałych naszych nauczycieli szczególnie jaśnieją postaci śp. Eugeniusza Jezińskiego i Zbigniewa Kopczyńskiego. Nie dawno czciliśmy sesją naukową pamięć pierwszego z nich [1].

Dzisiaj przypadł mi w udziale zaszczyt wygłoszenia tego referatu z okazji pięknego jubileuszu 95-lecia Zbigniewa Kopczyńskiego, powszechnie lubianego i podziwianego „Zbysia” (rys. 1, z 1979 r. [2]), jak przez



Rys. 1. Zbigniew Kopczyński

wielką sympatię nazywali go między sobą jego przyjaciele i uczniowie, drugiego nauczyciela mojego i całych pokoleń konstruktorów oraz nauczycieli akademickich.

Robiąc to z prawdziwą przyjemnością, składałam Szanownemu i Drogiemu Jubilatowi najserdeczniejsze gratulacje z powodu tytułu osiągnięć w tworzeniu fundamentów polskiego przemysłu transformatorowego i jego kadry oraz Najserdeczniejsze Życzenia

zdrowia i wszelkiej pomyślności.

Pana mgr inż. Zbigniewa Kopczyńskiego mam zaszczyt i przyjemność znać, jak wielu z nas, od ponad pół wieku. Najpierw jako jego student, a później jako młodszy partner w działalności naukowo-badawczej.

Dwukrotny laureat nagród państwowych za opracowania w zakresie konstrukcji transformatorów, skromny i życzliwy. Zawsze imponował nam swoją wiedzą, doświadczeniem zawodowym, stoickim spokojem i oszczędnością w słowach, z których każde miało swoją wagę. Promieniowała od niego pewność, właściwa osobom, które znają i kochają swój fach. Zawsze życzliwy dla każdego, eleganci, o sportowej sylwetce. Czuliśmy w nim pokrewieństwo narciarskie.

Jubilat był jednym z głównych autorytetów polskiego przemysłu transformatorowego, którego początki sięgają 90 lat wstecz, kiedy w roku 1917 powstała łódzka Fabryka Transformatorów ELEKTROBUDOWA. Fabryka ta była prowadzona przez zasłużoną dla tego miasta i kraju rodzinę Kopczyńskich. Jeszcze w czasie, gdy drżeliśmy jako dzieci z obawy przed rosnącą nad krajem grozą wojny, Jubilat pracował [2, 3] naukowo nad doskonaleniem konstrukcji największych wówczas polskich transformatorów<sup>1</sup>. Kiedy w roku 1964 opracowywaliśmy w Politechnice Łódzkiej projekt wstępny<sup>2</sup>, nowoczesnej i wielkiej na owe czasy, Fabryki ELTA (dziś ABB), rozmyślałem o tym, jakby postawić kiedyś przed jej wejściem dwa popiersia: „Kopczyński – Jeziński”.

## Straty dodatkowe w uzwojeniach

Byliśmy ze śp. Januszem Rachwalskim uradowani i zaszczytni, kiedy w marcu 1949 r., jako studenci II roku Politechniki Łódzkiej, otrzymaliśmy na temat Pracy Przejściowej, „I-go Egzaminu Dyplomowego” (tzw. Półdyplomu), badania laboratoryjne na specjalnie zbudowanym do tych prób transformatorze, w celu wszechstronnego sprawdzenia, szeroko stosowanego wówczas i dziś, szybkiego wzoru półempirycznego Z. Kopczyńskiego [3, 4]:

$$k = \frac{\Delta P_{u75}}{m I^2 R_{st75}} = 1 + \frac{0,35}{\rho \cdot 10^2} \cdot c^2 \frac{nh}{L_u} m > 1 \quad (1)$$

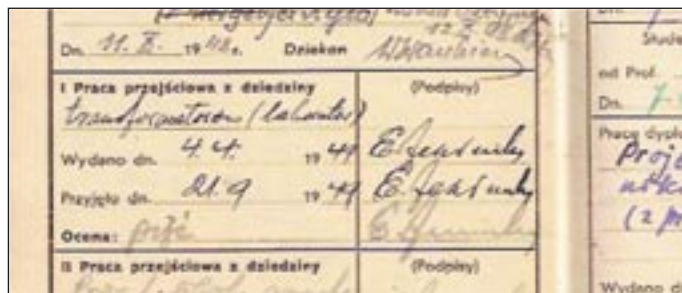
na współczynnik strat dodatkowych mocy w uzwojeniach współśrodkowych, o przewodach prostokątnych, przy 50 Hz, gdzie  $\Delta P_{u75}$  – straty mocy obciążeniowe (straty zwarcia),  $m I^2 R_{u75} = \Delta P_{u \text{ pod } 75}$  – straty podstawowe, W; m – liczba faz I – prąd znamionowy fazowy danego uzwojenia, A;

<sup>1</sup> Już w wtedy 21 MVA [2].

<sup>2</sup> Całości: E. Jeziński, M. Jabłoński, J. Rachwalski, J. Turowski i in. Laboratorium WN – M. Jabłoński, Maszynownia i stacja prób – T. Koter i J. Turowski.

$R_{st75}$  – rezystancja tego uzwojenia mierzona prądem stałym,  $\Omega$ , przeliczona na znormalizowaną temperaturę 75°C;  $\rho$  – rezystywność (opór właściwy) materiału przewodowego,  $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$  ( $=10^{-6} \Omega \text{ m}$ ); c, h – grubość i wysokość przekroju przewodu,  $\text{cm}$  ( $=10^{-2} \text{ m}$ ); n – liczba zwojów w warstwie uzwojenia szeregowego m – warstwowego;  $L_u$  – wysokość uzwojenia, cm. Wzór (1) przedstawiony jest wg ([5], str. 159), kiedy nie obowiązywał jeszcze międzynarodowy system jednostek SI. W nawiasach dodano więc jednostki SI.

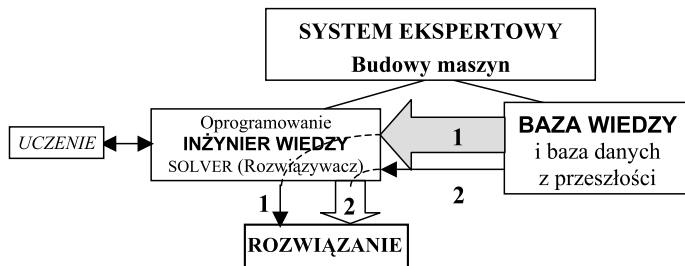
Niestety, nie zachowała się nasza „Praca Przejściowa Pierwsza”, która, jak pamiętam, dała pełne potwierdzenie eksperymentalne wzoru Z. Kopczyńskiego (1). Musiała być chyba dobrze oceniona, skoro zyskała wysoką ocenę w dniu 21.09.1949 r. w zachowanym jeszcze dziś Indeksie autora (rys. 2), z podpisem Kierownika Katedry prof. E. Jezińskiego. Wzór ten, pasuje dobrze do współczesnej mechatroniki, której jednym z podstawowych nakazów jest właśnie **szybkie projektowanie** (*Rapid Design*) [7], niezbędne w czasach dzisiejszej ostrej konkurencji rynkowej. Jest on szczególnie przydatny przy szybkim projektowaniu wielkich transformatorów, czym także autor zajmuje się jeszcze dziś.



Rys. 2. Wycinek z indeksu autora z wpisem zaliczenia I. Pracy Przejściowej, odbytej pod kierunkiem p. mgr inż. Zbigniewa Kopczyńskiego nt. weryfikacji laboratoryjnej Jego wzoru (1)

W zakresie pozostałych strat dodatkowych w uzwojeniach fundamentalne monografie E. Jezińskiego [5, 6], z udziałem Jubilata zachowały, mimo upływu lat, pełną wartość merytoryczną. Są bowiem zbudowane na głębokich podstawach fizycznych i matematycznych elektrodynamiki transformatorów, które się nigdy nie starzeją.

Stanowią jedynie, używając dzisiejszego języka mechatroniki [1, 9], *Bazę Wiedzy* do zautomatyzowanych systemów ekspertowych (rys. 3), która oczekuje na skomputeryzowanie przez zdolnego informatyka – „Inżyniera Wiedzy” i zasługuje na kolejne prace doktorskie i habilitacyjne. Ta baza, wzbogacana nieustannie dalszym wkładem do zawiłych, ale jakże pięknych, rozwiązań problemów strat dodatkowych w uzwojeniach, przez starszych i młodszych Kolegów Jubilata, jak: M. Jabłoński, T. Koter, M. Kozłowski, J. Kulikowski, J. Rachwalski, J. Turowski, J. Lasociński, K. Zakrzewski, M. Kaźmierski i A. Ketner i inni, jest w sposób dostateczny opanowana. Opiera się bowiem, wychodząc z fundamentalnych prac z roku 1908 W. Rogowskiego, profesora polskiego pochodzenia Politechniki w Akwizgranie (Aachen), po współczesną literaturę, na sprawdzonych i łatwiej rozwiązalnych analitycznie metodach pól elektromagnetycznych dwuwymiarowych



Rys. 3. Schemat blokowy systemu ekspertowego typu (a) projektowanie maszyn: 1- duży wkład wiedzy i doświadczenia – proste, tanie i szybkie rozwiązanie (np. 1 sek); 2 – mały wkład wiedzy i doświadczenia – trudne, kosztowne i pracochłonne rozwiązanie (np. 3 miesiące).

(2-D). Zrobiono tak dużo, że nie wiele już mogliśmy dorzucić, poza może równie prostymi i szybkimi wzorami autora ([10, 11], s. 277–278) na rozkład gęstości prądu i straty dodatkowe w uzwojeniach z folii

$$k_d \approx 1 + \frac{4a}{Nh} \left( 1 + \frac{a}{2N} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \gamma}{2}} \right) \quad (2),$$

gdzie  $a$  – łączna grubość gołych przewodów z folii,  $h$  – wysokość uzwojenia foliowego,  $N = \frac{2a_s}{(1-K_R)h} \approx 2+2,5$ ;  $K_R$  – współczynnik Rogowskiego,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\mu_0 = 0,4\pi 10^{-6}$  H/m,  $\gamma_{Al, 20^\circ C} = (33 \div 35) \cdot 10^6$  S/m. Wszystko w jednostkach SI.

Rozwiązanie to dobrze się potwierdziło ze zbyt zawiłymi, przez co nieużytecznymi w praktyce, wywodami specjalistów brytyjskich [12]. Problem ten został następnie rozwiązany numerycznie, metodą równań całkowych przez A. Krawczyka [13].

Choć zrobiono w sprawie strat dodatkowych w uzwojeniach prawie wszystko, to istnieją jeszcze obszary specjalne, czekające na następnego, używając języka mechatroniki (rys. 3), Inżyniera Wiedzy. Na przykład, podobne jak w [10], lub lepsze, oprogramowanie uzwojeń z szyn, a zwłaszcza proste i szybkie wzory „mechatroniczne” na straty w kadzi od odpływów typu (1) i (2) wg zasady „Reduced model i Rapid design”, lansowanej w nowoczesnym przemyśle mechatronicznym USA. Wobec coraz bardziej skrącanych zajęć z nauk klasycznych, coraz bardziej jest potrzebne utrwalenie tej wiedzy i języka zawodu w obszernych zapisach i podręcznikach, bez których nie sposób zrozumieć fizyki problemu i zbudować adekwatny model. To samo odczuwa przodujący amerykański przemysł elektroniczny. Jednocześnie, przy zbliżającym się nadmiarze elektroników i informatyków, rośnie deficyt klasycznych inżynierów mechaników i elektryków na całym świecie.

### Straty dodatkowe rozproszeniowe

Historię i rozwój łódzkiej szkoły naukowej oraz problemy i osiągnięcia naszego przemysłu wielkich transformatorów doskonale przedstawili w wywiadzie z 1979 [2] czołowi nasi specjaliści PP. *śp. Eugeniusz Jezierski, Zbigniew Kopczyński i śp. Maciej Kozłowski*. Miłą i zaszczytną niespodzianką było tam stwierdzenie *prof. E. Jezierskiego* ([2], str. 652) już wtedy, iż: „...Można teraz już chyba mówić o drugiej szkole, grupującej się wokół *prof. dr hab. J. Turowskiego* i zajmującej się ogólnie biorąc, zagadnie-

niami związanymi ze strumieniami rozproszenia, które ze wzrostem mocy transformatorów zaczynają odgrywać coraz większą rolę...”. Tzw. szkoła naukowa jest dziełem wielu osób, współpracujących na jakiejś wspólnej bazie. Autor miał jedynie szczęście do takiej grupy młodszych, utalentowanych Kolegów, którzy współpracując ze sobą w sposób spójny na bazie Elektrodynamiki Technicznej, trójwymiarowej (3-D) i nieliniowej  $[\mu(H); \gamma(t)]$ , wnieśli i wnoszą nadal duży wkład w rozwiązanie tych i wielu innych problemów naukowo-przemysłowych, otwierając nowe obszary badań i nauczania, w tym wspomnianej mechatroniki i informatyki. Są to m.in. b. doktoranci autora, a dziś wybitni specjaliści, często dziś profesorowie, m.in. Koledzy: *J. Lasociński, K. Zakrzewski, T. Janowski, P. Jezierski, Natalia Niewierowicz (Szwecja), M. Kaźmierski, E. Mendrela (USA), J. Nowaczyński, Ewa Gierczak, Janina Fleszar, P. Witczak, K. Komeza, A. Pelikant, G. Zwoliński*, ich kolejni doktoranci oraz liczni współautorzy i współbadacze krajowi i zagraniczni, w tym wywodzący się z naszej szkoły *J. Sykulisz (OK.), J. Gieras (USA)*.

Do tego dołączyć należy większość fabryk transformatorów i kilka uczelni na całym świecie, które zakupiły lub w inny sposób używają naszych programów klasy RNM-3D (tabl. 1) automatycznych obliczeń i projektowania środków redukcji strat rozproszeniowych i niekontrolowanych lokalnych przegrzań. W zbudowaniu zautomatyzowanych programów RNM-3D decydującą rolę (inżynierów wiedzy) odegrali ówczesni studenci Instytutu Elektroniki PŁ *Marek Turowski* i *Mirosław Kopeć* [25, 26]. Duży, wkład twórczy wnieśli tu także współautorzy z Włoch *Marisa Rizzo (Palermo)* i *A. Savini (Pavia)*, z Niemiec *V. Reis*, Australii *Z. Pudłowski*, partnerzy z fabryk zagranicznych, zwłaszcza z Indii *D.A. Koppikar, S.V. Kulkarni (Bombaj)*, którzy testowali w metalu na wielkich transformatorach programy RNM-3D (tabl. 2), z Hiszpanii i Portugalii *X. Lopez-Fernandez*, z Chin, USA, Belgii i in.

Wśród najważniejszych partnerów przemysłowych polskich, obok Jubilata, wymienić należy najważniejszego dla tej sprawy Sponsora, którym był *śp. Zdzisław Krzywański*, b. dyrektor techniczny ELTY. Wszyscy w jakiś sposób jesteśmy następcami szkoły transformatorowej *Jezierskiego* i *Kopczyńskiego*, pionierów w tej dziedzinie.

Znaczenie tabl. 1 jest nie tak ważne komercyjnie, jak podstawowe dla weryfikacji przemysłowej całej klasy naszych programów trójwymiarowych RNM-3D. Powodzenie naszej metody jest wywołane rosnącym kosztem strat energii i coraz częstszymi zagrożeniami transformatorów i systemów energetycznych, w rodzaju amerykańsko-kanadyjskich „Blackout”<sup>3</sup>, i podobnymi europejskimi i... polskimi wydarzeniami...

Istotnie, wraz ze wzrostem mocy znamionowej transformatorów i koncentracji pól rozproszenia w obrębie ograniczeń gabarytowych, przy coraz częstszych przeciążeniach, ciężar problemów strat dodatkowych przemieścił się z przestrzeni pól liniowych (2-D) w oknie transformatora,

<sup>3</sup> Wielkie Północno-Wschodnie Zaciemnienie (*The Great North-East Blackout of 1965*) roku było największą awarią energetyczną w historii. Powtórzyło się to w USA 1977, 1996, 2003, we Francji 1978, 2003, ale także w Warszawie i pół-wschodniej Polsce w maju 2006.

Tabl31a 1. Lista użytkowników programów RNM-3D (MSR—3D)

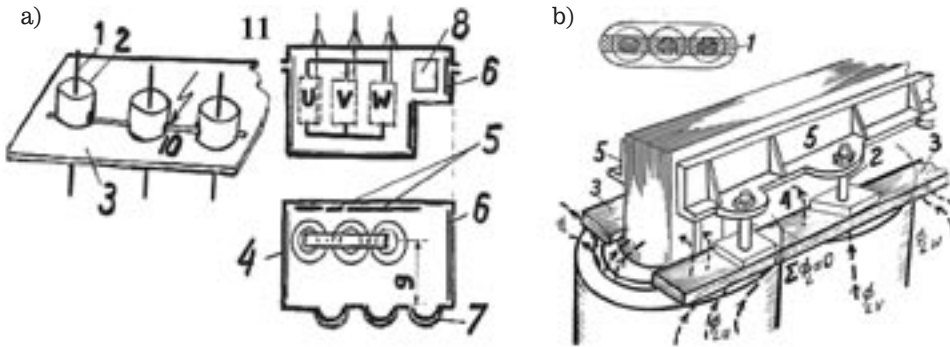
1	Fabryka Transformatorów SKODA -Pilzno, Czechy, 1969. J. Kopecek, J. Klesa Weryfikacja fabryczna.
2	Fabryka Transformatorów ELTA, Łódź, Polska (1987–1988)
3	Transformer Works SHENYANG, Chiny (1991–92)
4	Transformer Works <b>GEC-ALSTOM</b> OF INDIA, Allahabad, Indie (1991–1992)
5	University of Sydney. Department of Electrical Engineering, , Australia (1992)
6	Transformer Works BAODING, (1993), i inne Uniwersytety i Fabryki, Chiny
7	Transformer Works <b>CROMPTON</b> GREAVES, Bombaj (Mumbai), Indie (1993)
8	Zakłady Remontowe Energetyki ENERGOSERWIS, Lubliniec, Polska (1993)
9	Transformer Works NGEF-ABB, Bangalore, Indie, (1994)
10	Transformer Works WILSON TRANSFORMER, <b>Australia</b> , (1994)
11	Transformer Works CROMPTON GREAVES, RNM-3Dsc – Program źródłowy Bombaj, Indie (1994).
12	Transformer Works WILSON TRANSFORMER, Australia, (1994). Obliczenia testowe.
13	Transformer Works NORTH AMERICAN TRANSFORMERS, Milpitas CA, U.S.A., 1995 r.
14	Transformer Works IRAN-TRANSFO ( <b>SIEMENS</b> ), Teheran (1995).
15	Transformer Works HACKBRIDGE-HEWITTIC AND EASUN, .Madras, Indie (1995)
16	Monash University. Department of Electrical Engineering. Melbourne, Australia (1995)
17	Transformer Works Transformers And Electricals Kerala ( <b>HITACHI</b> ), Kerala, Indie (1996)
18	Transformer Works BHARAT HEAVY ELECTRICALS, Bhopal, Indie (1996)
19	Transformer Works CROMPTON GREAVES, Bombaj Indie Program „Nagrzewanie złączy 1996 r.
20	Transformer Works CROMPTON GREAVES, Bombaj (Mumbai) Indie Program „Clampings”.1998.
21	Transformer Works CROMPTON GREAVES, Bombaj (Mumbai) Indie Program „Turret”
22	Transformer Works CROMPTON GREAVES, Bombaj (Mumbai) Indie Program RNM-3Dasm 1999
23	Transformer Works <b>EMCO</b> TRANSFORMERS LIMITED. Bombaj (Mumbai), Indie, 1997
24	Instytut Energetyki, Warszawa-Mory, Dr. J. Kulikowski
25	University of <b>Palermo</b> , Italy. Department of Electrical Engineering, Włochy, 1998
26	University of <b>Pavia</b> , Italy. Department of Electrical Engineering, Włochy, 1998
27	Zakłady Remontowe Energetyki ZREW S.A., Janów, Polska (1998)
28	<b>Pouwels Trafo</b> Belgium, Mechelen, Belgia (1999). RNM-3Dexe
29	Ingenieria y Desarrollo Transformadores de Potencia, Tlalnepantla, Meksyk. Testowanie (2000)
30	Delta Star Inc. San Carlos, CA. <b>USA</b> . Testowanie (2000)
31	Fabryka Transformatorów <b>ABB-ELTA</b> Łódź (2000)
32	Pouwels Trafo Belgium, Mechelen Belgia (2000). RNM-3Dasm, source code
33	GE-PROLEC. Power Division. Transformer Manufacturer. Monterrey. <b>Mexico</b> . Testowanie (2000)
34	Delta Star Inc. San Carlos, CA. <b>USA</b> . Pakiet RNM-3Dexe (2001)
35	<b>ABB</b> Łódź. Przeliczenie ponad 30 transformatorów od 25 - 330 MVA. poprawa ekranowania (I. Kraj)
36	<b>ABB</b> Łódź Rozwój automatyzacji modelowania i obliczeń strat mocy rozproszonych
37	Power Transformers Division <b>ABB</b> . 1600 Lionel-Boulet Blvd. Varennes, <b>CANADA</b> . Straty mocy i lokalne przegrzania w kominkach przepustów wielkopradowych trafo 440 MVA 1faz. 2003
38	University of Vigo – Hiszpania, kwiecień 2006.
39	Fabryka Transformatorów EFACEC Porto, Portugal, wrzesień 2006

do pól rozproszenia silnie trójwymiarowych (3-D) poza obszarem okna (rys. 4).

Na rys. 4. przedstawiono schematycznie większość miejsc zagrożeń w wielkich transformatorach, z których prawie każdy zasługuje na poważne badania podstawowe i stosowane. Są to m.in.: a) 1-przepusty ([9], s. 252–254, 282–288), 2-kominki [14,19], 3-pokrywa [9, 15, 19], 4-kadź [1], 5-ekrany (boczniki) magnetyczne (bezpieczniejsze) [9], 6-ekrany elektromagnetyczne Al. lub Cu [9], 7- kieszenie olejowe, 8-przełącznik zaczeów, 9-asymetria kadzi [17], 10-Hot-Spot ([9], s. 380–382, [14, 19]), 11-złącza śrubowe ([9], s. 382; b) 1-obszar akceptowalny do obliczeń 2-D

(*M. Kaźmierski* [8]), 2-śruby z ekranami Al/Cu, 3-kolektory strumienia rozproszenia [20], 4- poprzeczne wnikanie strumienia do blach ([9], s. 405), 5-belki jarzmowe, złącza pokrywy z kadzią i in..

Tu już nie chodzi o oszczędności kilkuprocentowe i kilka stopni C, jak w obrębie uzwojeń, lecz o eliminację strat mocy wartości 30% [21] całego transformatora, duże nieświadome koszty materiałów wskutek błędnego ekranowania kadzi oraz lokalne przegrzania, które mogą zniszczyć całą jednostkę, zablokować produkcję z braku wymaganych przez klienta obliczeń na wypadek



Rys. 4. Części stalowe w polu rozproszenia 3-D zagrożone nadmiernymi stratami mocy i lokalnymi przegrzaniem od prądów wirowych

przeciążeń największych jednostek, jak w przypadku kominków w ABB [14].

O ile wszystkie prawie problemy klasyczne projektowania, zamykające się w oknie transformatora i w obszarze pól 2-D (rys. 4b/1) można uznać za dobrze opanowane, to cały obszar poza oknem wymaga dokładnego modelowania i obliczeń 3-D.

Autorowi są znane tylko 2 przykłady obliczeń trójwymiarowych 3-D pola i strat rozproszeniowych w kadzi o znaczeniu przemysłowym. Są to:

1) **Metoda elementów skończonych trójwymiarowa MES-3D** (ang. FEM-3D) *Electromagnetic Laboratory GEC* – Stafford, UK (rys. 5). Są to bardzo piękne, kolorowe rysunki, ale sami autorzy [22] uznali FEM-3D za „nieprzydatną do regularnego projektowania”.



Rys. 5. Trójwymiarowe FEM-3D rozwiązanie pola i strat w kadzi wielkiego dławika trójfazowego 1680 MVar, 400 kV, x=40% GEC Transformers Ltd. [22]:

a) Siatka MES na 20432 węzły;

b) Rozkład gęstości strat mocy i Hot-spot na wewnętrznej ścianie kadzi.

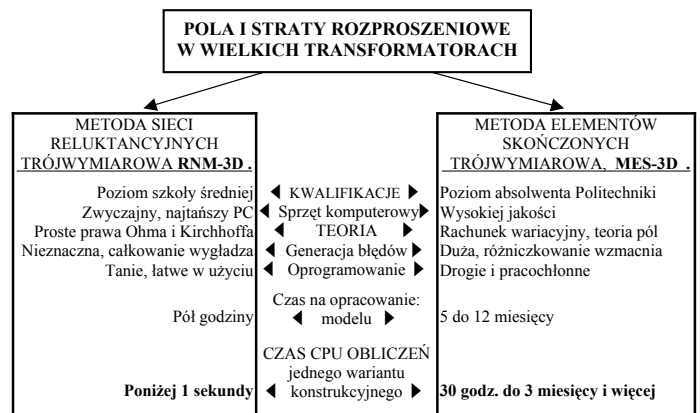
Autor opublikował rysunek w [27] za uprzejmą zgodą Autorów.

2) **Metoda równoważnych Sieci Reluktancyjnych trójwymiarowa MSR-3D** (ang. RNM-3D), szeroko stosowana w przemyśle transformatorowym na całym świecie (tabl. 2), dzięki jej łatwości, taniości, wszechstronności i szybkości działania, spełniającej w tym zakresie doskonale wymagania *Rapid design* nowoczesnej mechatroniki. Zastosowany tu szybki, ekspertowy, program hybrydowy (*MAN&MSR*) do obliczeń pól trójwymiarowych, MSR-3D (ang. RNM-3D) pozwala zrealizować na PC wiele zadań, w czasie miliony razy krótszym (rys. 6), niż zbyt ogólne programy komercyjne 3-D. Ta prosta idea metoda oparta jest na znanych i łatwo zrozumiałych prawach *Ohma* i *Kirchhoffa*. Tajemnica jej dokładności tkwi jednak nie w tym, lecz w Bazie Wiedzy,

w której – zgodnie z zasadą mechatroniki – wykorzystano głębokie, wieloletnie badania podstawowe dla doboru parametrów sieci. Prawa robocze zaś pozostają niezwykle proste. Są to tzw. magnetyczne prawa *Ohma* i *Kirchhoffa*. Dzięki temu można już było prowadzić szybkie interaktywne [23] badania i projektowanie przemysłowe (tabl. 2) w oparciu o ogólny wzór całkowity, także odpowiadający wymaganiu *Rapid Design* mechatroniki

$$\Delta P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\gamma}} \left[ p_e \int_{A_e} |H_{ms}|^2 dA_e + p_m \int_{A_m} |H_{ms}|^2 dA_m + a_p \int_{A_{St}} \sqrt{\mu_r} |H_{ms}|^2 dA_{St} \right] = I^2 (a+bI) \quad (3)$$

gdzie  $p_e \ll 1$ ,  $p_m \ll 1$  współczynniki ekranowania ([1.6], s. 174, 180, 198, 200, 226)  $A_e$ ,  $A_m$ ,  $A_{St}$  – powierzchnie pokryte odpowiednimi ekranami elektromagnetycznymi, zwykle 7 mm Al (e), lub magnetycznymi (m) tzn. bocznikami magnetycznymi spakietowanymi z pasków blachy transformatorowej, względnie ściany stalowej nieekranowanej (St).



Rys. 6. Porównanie szybkiego pakietu RNM-3D [1, 16, 23, 24], opartego na idei systemów ekspertowych z ogólnym programem komercyjnym FEM-3D [22] na przykładzie obliczeń pola i strat rozproszeniowych w transformatorze

### Mechatronika transformatorów w działaniu

Mechatronika wyłoniła się nie dawno (1970–80) w wyniku postępu technicznego mikroelektroniki i techniki komputerowej. Po czym ogarnęła nowoczesny przemysł.

Dla doświadczonych inżynierów elektryków, nie była niespodzianką. Ich prace projektowe, od zawsze szły w tym kierunku. Jest to natomiast nowym wyzwaniem dla nauczania.

Nie mniej jednak to słowo odzwierciedla w jakiś sposób stan wiedzy. Do podstawowych cech mechatroniki należą stare, do dziś aktualne doświadczenia:

1) proste narzędzia na bazie głębokich badań podstawowych (System ekspertowy),

Tablica 2. Porównanie wyników obliczeń strat rozproszonych pakietem „RNM-3Dexe” do wyznaczania prądów wirowych i strat rozproszonych w transformatorach z częściowymi ekranami magnetycznymi na powierzchni kadzi, z pomiarami na stacji prób fabryki transformatorów *Transformer Works Crompton Greaves Ltd Mumbai (Bombaj), Indie* [6.4].

Transformator	Obliczone straty dodatkowe w uzwojeniach + rozproszeniowe					3I <sup>2</sup> R	Obliczone Σ	Zmierzone	Różnica
	MES wirowe uzwojeń	RNM-3D w kadzi	W odpływach wieloprądowych	Belki i inne rozproszeniowe	Całkowite	Podstawowe	obciążeniowe	obciążeniowe	w %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
31.5 MVA, 132/33 KV	13.9	8.16	0.78	0.45	23.29	95.46	118.75	118.0	-0.6 %
80 MVA, 138/10.5 KV	33.87	16.27	5.4	1.2	56.74	225.72	282.46	289.0	2.3 %
150 MVA, 230/10.5 KV	36.26	13.75	9.9	3.5	63.41	377.4	440.81	448	1.6 %
160 MVA, 220/132/11 KV	35.5	60.61	1.0	10.8	107.91	242.7	350.61	342	-2.5 %
160 MVA, 220/145/12 KV	22.91	23.11	0.9	5.1	52.02	194.9	246.92	250	1.2 %
315 MVA, 400/220/33 KV	57.43	36.97	1.2	15.8	111.4	425.8	537.2	524.5	-2.4 %

2) powierzanie wdrożeń idei podstawowych innym odpowiednim specjalistom (*Outsourcing, Inżynier wiedzy*)<sup>4</sup>,

3) szybkie projektowanie (m.in. syntetyczny wzór *Kopczyńskiego*) – owe amerykańskie *Rapid Design, Reduced models* i *Time to Market*, wymuszone ostrą konkurencją rynkową oraz łatwością dostępu do *Know How*.

Jest wiele przykładów poza RNM-3D, kiedy owe zasady zadziałały b. dobrze. Na przykład:

1. Jeszcze w r. 1964 Na sesji plenarnej CIGRE wystarczyło zaprezentowanie wniosków ujętych wzorem (3), by pod naciskiem klientów Komitet Studiów SC No 12 (Transformatory) jeszcze tego samego dnia, mimo protestów fabryk, podniósł minimalny wymagany prąd przy próbie zwarcia z 25 do 50% [23]. Domagano się nawet 100% i więcej, co dziś jest już normalną praktyką.

2. W roku 1974 ówczesny Dyrektor Tech. ELTY Z. *Krzywański* prosił o szybkie obliczenie strat dodatkowych w uzwojeniach z folii, stwierdzające „jeżeli będą one większe niż 5–10%, to oferowanej licencji nie kupujemy”. Nikt nie umiał tego liczyć. Metoda *Mullineux* [12] nie nadawała się do użytku. Podejście *Rapid Design* i *Reduced model* pozwoliło wyprowadzić wzory [11] przez analogię z silnikiem głębokołożkowym. Licencje kupiono, a wzory używano dalej, w tym za granicą do rozwiązania nagrzewania, w folii ([10] s. 282).

<sup>4</sup> Np. takimi inżynierami wiedzy dla RNM-3D można nazwać ówczesnych studentów Elektroniki PŁ. Pp. *Miroslawa Kopcia* i *Marka Turowskiego* [25, 26], twórców oprogramowania RNM-3D.

3. W roku 1969 mówiono, że w licencji Siemens pod ekrany elektromagnetyczne daje się przerwę izolacyjną. Proste przeliczenie ([10], s. 68) wykazało, że nic to nie daje.

4. We współczesnych wielkich transformatorach masowo stosuje się boczniki magnetyczne na ścianie kadzi. Analiza za pomocą RNM-3D [24] wykazała, że producenci i nabywcy, nie używając RNM-3D, nie wiedzą, że złe ich rozmieszczanie może powodować wręcz nie zmniejszenie, a wzrost strat mocy. Przy okazji, zarówno producenci, jak i nabywcy, są narażani na wzrost kosztu strat skapitalizowanych nawet do setek tysięcy USD na jednej jednostce [21]. Podobne skutki mogą powodować kadzie asymetryczne (rys. 4, p. 6, 7, 8), jeżeli nie zastosujemy programu asymetrycznego „RNM-3Dasm”.

5. Jeden z ostatnich przypadków, to dramatyczne wołanie o pomoc jednego z wielkich zakładów w Kanadzie, kiedy nabywca nie chciał odebrać ze stacji prób największego na świecie transformatora jeżeli nie otrzyma przeliczenia kominków na ewentualne przeciążenia. Znow trzeba było zastosować mechatroniczną zasadę *Reduced model* i *Rapid Design* [14]. Transformator wyszedł z fabryki. Jak zwykle w produkcji, nie było czasu na zabawę z akademicką MES-3D. Takich przypadków było i jest wiele.

## Wnioski

Wspaniały dorobek naszych zasłużonych Autorytetów, jak Jubilat i wcześniejszych pokoleń badaczy żyje i owocuje nadal. Przybrał jedynie inne, dostosowane do czasów,



nazewnictwo „mechatroniczne”, jak Systemy ekspertowe, bazy wiedzy, bazy danych, ekspert dziedzinowy, inżynier wiedzy itd. oraz nowe doskonałe narzędzia informatyczne. Można by to teraz nazwać mechatroniką techniczną, lub energetyczną, tak jak już się zadomowiła nazwa elektrodynamika techniczna.

## Literatura

- [1] Turowski J.: *Systemy ekspertowe w projektowaniu transformatorów*. Przegląd Elektrot. Nr 3, 2002 r., s. 63.
- [2] Harasimowicz E.: *Badania, konstrukcje i produkcja transformatorów elektroenergetycznych w Polsce*. Wiadomości Elektrotechniczne. Nr 24, 1979, s. 650–653.
- [3] Kopczyński Z.: *Straty dodatkowe w uzwojeniach transformatorów*. Przegląd Elektrotechniczny. 1938, s. 334.
- [4] Kopczyński Z.: *Straty dodatkowe w uzwojeniach w zależności od nagrzania*. Przegląd Elektrot. 1939, s. 215.
- [5] Jezierski E.: *Transformatory. Podstawy teoretyczne*. WNT. Warszawa, 1965.
- [6] Jezierski E., Kopczyński Z. i in.: *Transformatory. Budowa i projektowanie*. WNT. 1963.
- [7] Turowski J.: *Podstawy Mechatroniki*. 2006. W przygotowaniu do druku.
- [8] Kaźmierski M.: *Ocena przybliżonych metod analizy pola elektromagnetycznego w transformatorach*. Rozprawy Elektrotechniczne, vol.16, pp. 3–26, No.1, 1970.
- [9] Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*. Warszawa, WNT 1993.
- [10] Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. W-wa WNT 1982
- [11] Turowski J.: *Metoda obliczania strat dodatkowych w uzwojeniach transformatora wykonanych z folii, taśm i szyn*. Materiały Sympozjum Uniejów 26–28.09.1974, s.1–8 i Transactions IEEE. 1976 USA.
- [12] Mullineux N. i in.: *Current distribution in sheet and foil-wound transformers*. Proc. IEE, No 1, 1969, p. 127.
- [13] Krawczyk A.: *Metoda obliczeń elektromagnetycznych transformatorów z uzwojeniami foliowymi*. Politechnika Łódzka. 1977. Rozprawa doktorska pod kierunkiem J. Turowskiego.
- [14] Turowski J.: *Rapid Evaluation of Excessive Local Heating Hazard in Bushing Turrets of Large Power Transformers*. International Conference on Electrical Machines – ICEM'04. Sept. 5–8, 2004, Cracow Poland.
- [15] Turowski J., Pelikant A.: *Eddy current losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers*. IEEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. Vol. 144 No. 6. November 1997, pp. 435–440.
- [16] Turowski J.: *Zastosowanie sieci reluktancyjnych do wyznaczania strat rozproszonych w kadziach transformatorów*. „Transformator 99”. Wyd. SEP, 27–30.04.1999. Kołobrzeg, s. 19–27.
- [17] Zwolinski G., Turowski J., Kulkarni S.V., Koppikar D.A.: *Method of fast computation of 3-D stray field and losses in highly asymmetric transformers*. TRAFOTECH'98. 23–24.01.1998. Mumbai, India, pp. I-51–58.
- [18] Pelikant A., Turowski J., Zwoliński G.: *Trójwymiarowe obliczanie pola i strat rozproszenia w transformatorach niesymetrycznych*. Materiały II Krajowej Konferencji pt. Transformatory Energetyczne i Specjalne – Janów'98. 14–16.10.1998. Kazimierz Dolny, s. 13–21.
- [19] Turowski J., Pelikant A.: *Eddy current losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers*. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution. Vol. 144 No. 6. November 1997, pp. 435–440.
- [20] Rizzo M, Savini A., Turowski J.: *Influence of Flux Collectors on Stray Losses in Transformers*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No 4. July 2000, pp. 1915–1918.
- [21] Turowski J.: *Modele 3-D skapitalizowanych strat rozproszonych i sił zwarciovych w transformatorach*. Materiały IV Konferencji N-T. pt. Transformatory Energetyczne i Specjalne. s. 69–75. 25–27.09.2002. Kazimierz Dolny.
- [22] Coulson M.A., Preston T.W., Reece A.B.: *3-Dimensional Finite Element Solvers for the Design of Electrical Equipment*. COMPUMAG'85 Conference, Fort Collins, USA, 1985.
- [23] Turowski J.: *Szybkie obliczanie i redukcja strat rozproszonych w transformatorach*. Przegląd Elektrotechniczny nr 5, 1998, s. 113–117.
- [24] Turowski J., Kraj I., Kulasek K.: *Przemysłowa weryfikacja szybkich metod projektowania w transformatorach*. Międzynarodowa Konferencja Transformator'01, 5–6 września 2001 r., Bydgoszcz.
- [25] Turowski M., Kopec M.: *Dedicated network program for interactive design of screens and field distribution in electromagnetic devices*, Rozprawy Elektrotechniczne, vol. 32, pp. 835–844, No. 3, 1986.
- [26] Turowski J., Turowski M., Kopec M.: *Method of three-dimensional network solution of leakage field of three-phase transformers*. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 26, No 5, September 1990, pp. 2911–2919.
- [27] Turowski J. (Red.): *Analiza i synteza pól elektromagnetycznych*. Ossolineum Wrocław 1990.

**Prof. dr hab. inż. Janusz Turowski**  
**Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych**  
**Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi**  
**emerytowany profesor**  
**Instytutu Mechatroniki i Systemów Informatycznych**  
**Politechniki Łódzkiej**

Mirosław Dąbrowski

## Naukowe podstawy powstania i rozwoju transformatorów

### 1. Tworzenie podstaw teoretycznych

Podstawy teoretyczne transformatorów stworzyli w pierwszej połowie XIX wieku m.in. Duńczyk Hans Christian Ørsted (1777–1851), Anglik Michael Faraday (1791–1867), Amerykanin Joseph Henry (1797–1878), pochodzenia niemieckiego profesor oraz członek Rosyjskiej Akademii Nauk w Petersburgu Heindrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865), Francuz André Marie Ampère (1776–1836). Podstawowe równania napięciowe obwodów uzwojeń induktorów oraz transformatorów pierwszy sformułował niemiecki fizyk Herman Ludwig Ferdynand Helmholtz w 1851 r.

Związek między elektrycznością a magnetyzmem potwierdził w 1820 r. H. Ch. Ørsted w pracy *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, wykazując, że „voltaiczny” „konflikt elektryczny” w przewodzie wytwarza wokół niego pole magnetyczne i siłę na igłę magnetyczną. W 1820 r. A. M. Ampère nawiązując do prac Ørsteda odkrył mechaniczne oddziaływanie przewodów elektrycznych zasilanych z ogniw galwanicznych stwierdzając, że wynikają one z przepływu elektryczności, który nazwał „prądem elektrycznym”. Ampère założył, że siły oddziaływania między elementami prądowymi są centralne tzn., że podobnie jak siły między ładunkami elektrycznymi działają wzdłuż linii prostej łączącej elementy i że co do wartości bezwzględnej są jednakowe, ale skierowane przeciwnie. Podana przez niego zależność w 1826 r. różni się od obecnie znanego wzoru na siłę oddziaływania między prądami. Błąd wynikał z założenia, że siły działające na elementy prądowe są skierowane wzdłuż tej samej linii prostej; poprawkę do wzoru Ampère’a wprowadził Niemiec Wilhelm Eduard Weber oraz Szkot James Clerc Maxwell.

Michael Faraday, zainspirowany wynikami badań Ørsteda, opisał 29 sierpnia 1831 r. eksperyment, w którym wykrył, że zmieniające się w czasie pole magnetyczne indukuje siłę elektromotoryczną w obwodzie skojarzonym z tym polem. Faraday wyraził odkryte prawo indukcji elektromagnetycznej słownie; jego analityczną formę, uzupełnioną zwrotem indukowanej siły elektromotorycznej  $e$ , podał w 1832 r. H. F. E. Lenz. Dlatego zależność:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

w której:  $\Phi$  – strumień magnetyczny,  $t$  – czas; jest nazywana prawem Faraday’a-Lenza. Nad zjawiskiem indukcji prądu przez zmienne skojarzenie magnetyczne

pracował w tym samym czasie w Stanach Zjednoczonych Joseph Henry i w 1832 r. opublikował pracę o wykrytym przez siebie zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej. Nad priorytetem, kto pierwszy odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej – Faraday czy Henry, toczy się od 1832 r. dyskusja; nie budzi zastrzeżeń pogląd, że obaj niezależnie od siebie odkryli oraz doświadczalnie potwierdzili to zjawisko. Dlatego w niektórych krajach, np. Stanach Zjednoczonych, zależność (1) jest nazywana prawem Faraday’a-Henry’ego. W tym samym roku Henry opublikował artykuł: *Electrical Self-induction in a Long Helical Wire*, w którym wprowadził pojęcie samoindukcji oraz indukcji wzajemnej elementów obwodów elektrycznych. W uznaniu jego wkładu do teorii elektromagnetyzmu na Międzynarodowej Konferencji Elektrycznej w Paryżu w 1889 r. jednostkę indukcyjności nazwano henr.

Rozszerzoną postać zależności (1) przedstawiono w pracy [3].

### 2. Induktory i iskrowniki

Prawo indukcji elektromagnetycznej znalazło pierwsze zastosowanie w budowie induktorów do generacji wyładowań iskrowych. Zjawisko to zaobserwował J. Henry, rozwijając w 1829 r. uzwojenie elektromagnesu. Henry zbudował największy w owym czasie elektromagnes o kilku wielozwojowych cewkach połączonych równolegle. W odróżnieniu od pierwszego elektromagnesu wykonanego przez Anglika Williama Sturgeona w 1825 r., o szeregowo połączonych wszystkich zwojach, nazwanego przez Henry’ego „ilościowym”, elektromagnes o równolegle połączonych cewkach nazwał „intensywnościowymi”.

Strukturę przyszłych induktorów iskrowych i transformatorów jednofazowych miały już pierwsze urządzenia budowane przez Faraday’a. Początkowo eksperymentował on na cewce sześciowarstwowej nawiniętej na toroidalnym rdzeniu drewnianym, której warstwy parzyste połączył szeregowo w jedno, a nieparzyste – w drugie uzwojenie. Załączając jedno z uzwojeń do baterii ogniw galwanicznych a drugie do galwanometru stwierdził jego odchylenia tylko podczas załączania i wyłączania źródła zasilania. Zauważył także, że wywoływany impuls prądowy, który nazwał „prądem indukowanym”, jest silniejszy po zastosowaniu rdzenia stalowego oraz po nawinięciu uzwojeń obok siebie. Faraday eksperymentował także z induktorem o rdzeniu otwartym, w którym żelazny rdzeń mógł być przesuwany względem cewki i stwierdził, że galwanometr wychyla

się podczas wysuwania i wsuwania rdzenia. Zjawisko to nazwał „indukcją magnetoelektryczną”, a powstawanie impulsów prądowych przy stałym położeniu rdzenia i łączeniu źródła zasilania – „indukcją woltoelektryczną”.

Budową induktorów, poczynawszy od 1835 r. do końca XIX wieku, zajmowało się wielu badaczy i konstruktorów. Praktyczne zastosowanie znajdowały one w laboratoriach – np. Wilhelm Conrad Röntgen posługiwał się induktorem przy odkryciu w 1895 r. promieniowania elektromagnetycznego, nazwanego później rentgenowskim.

Początkowo nie zdawano sobie sprawy z różnic w budowie transformatora energetycznego prądu przemiennego oraz induktora generującego impulsy napięciowe o regulowanej częstotliwości, zasilanego przerywanym prądem stałym. Zauważono jednak, że induktory o otwartym obwodzie magnetycznym są bardziej „iskrowo wydajne”, niż induktory o obwodzie zamkniętym. Ta okoliczność ujemnie wpłynęła na rozwój transformatorów w owym czasie.

Jeśli wymaga się od induktora nieprzerwanego następstwa impulsów, to prąd w obwodzie pierwotnym należy załączać i wyłączać w sposób ciągle powtarzalny. Pierwszy tak działający induktor wykonał w 1836 r. fizyk francuski Antoine-Philibert Masson. W tym samym roku Charles Grafton Page w Stanach Zjednoczonych zbudował induktor ze spiralną cewką i sześcioma zaciskami; do dwóch pierwszych podłączył ogniwo galwaniczne w szereg z przerywaczem obwodu. Page stwierdził występowanie impulsów napięciowych między dowolnymi pozostałymi zaciskami. Zatem Page pierwszy wykonał układ cewek stosowany ok. 55 lat później w autotransformatorach.

W 1837 r. irlandzki pastor i profesor fizyki w St. Patric's College w Maynooth koło Dublinia, Nicholas Joseph Callan wykonał induktor o dwóch rozdzielnych uzwojeniach międzykolejnych. Było to pierwsze urządzenie elektromagnetyczne o koncentrycznych uzwojeniach i zróżnicowanych średnicach drutu nawojowego, typowych dla transformatora.

Najszerzej znany w Europie induktor, stosowany np. jako cewka zapłonowa silników spalinowych, opracował w 1851 r., w Paryżu technik Heinrich Daniel Rühmkorff. Zwrócił on uwagę na układ izolacyjny cewki wtórnej i na poprawę pracy rtęciowego przerywacza, dzięki temu induktor o dużym napięciu wtórnym miał zmniejszone wymiary i mniejszą masę. Do ulepszenia induktorów Rühmkorffa przyczyniło się wielu fizyków i konstruktorów. Najbardziej znaczące uzupełnienie wprowadził w 1853 r. fizyk francuski Henryk Daniel Luis Fizeau, dołączając kondensator szeregowo z uzwojeniem pierwotnym.

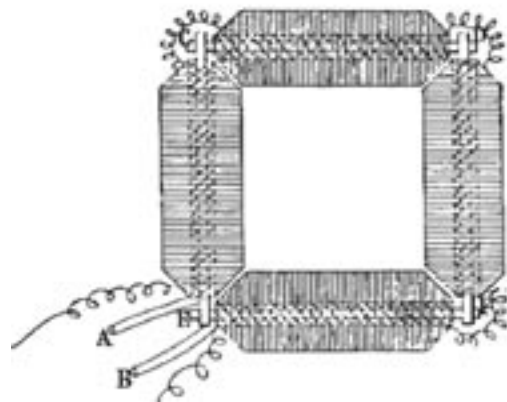
Na światowej wystawie w Paryżu w 1855 r. induktor Rühmkorffa uzyskał pierwszą nagrodę, a jego twórca Krzyż Legii Honorowej. Za pomocą induktora o długości 52 cm zbudowanego w 1867 r., zasilając uzwojenie pierwotne napięciem stałym 15 V, otrzymał on napięcie pulsujące o wartości szczytowej ok. 100 000 V. Uzyskane przez Rühmkorffa odznaczenia i nagrody oraz nagłośnienie jego zasług wywołały wzburzenie – przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych. Wyjaśnieniem zagadnień priorytetowych oraz patentowych zajęła się komisja powołana przez Kongres tego kraju, badając naruszenie praw autorskich Ch. G. Page.

Największy induktor zbudował w Anglii A. Apps w 1876 r. dla Politechnicznego Instytutu w Londynie.

Rdzeń induktora był wykonany z drutów żelaznych tworzących walec o średnicy ok. 96,8 mm i długości ok. 111,8 cm. Uzwojenie pierwotne miało 1344 zwoje, a wtórne – 341 850 zwojów.

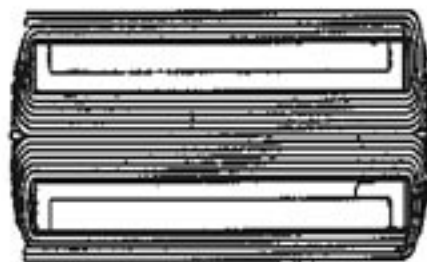
### 3. Pierwsze koncepcje transformatorów

Nazwa „transformator” pojawiła się w 1885 r. w opisach patentowych, które zgłosili O. T. Bláthy, M. Deri i K. Zipernowsky z Budapesztu oraz w artykule W. C. Rechniewskiego [11]. Dwuuzwojeniowy induktor o zamkniętym obwodzie magnetycznym pierwszy zastosował Thomas Allan z Edynburga – rys. 1. Zaproponowany w 1852 r. obwód magnetyczny oraz cztery pary uzwojeń połączone szeregowo wyprzedzają o niemal 50 lat konstrukcję, którą zastosował w 1900 r. I. Epstein w aparacie do pomiaru stratności blach magnetycznych.



Rys. 1. Induktor dwuuzwojeniowy o zamkniętym obwodzie magnetycznym zaproponowany przez Th. Allana w 1852 roku

Przyrząd o zamkniętym obwodzie magnetycznym wykonany z miękkich drutów żelaznych opracował Anglik Cromwell Fleetwood Varley w 1856 r. Druty tworzące rdzenia zostały tak wygięte, że zewnątrz opasują uzwojenia – rys. 2. Można zatem przyjąć, że Varley zbudował pierwszy transformator płaszczowy.



Rys. 2. Transformator płaszczowy o zamkniętym obwodzie magnetycznym wykonany z drutu według konstrukcji C. F. Varley'a z 1856 roku

Anglik Sir William Robert Grove pierwszy w 1868 r. przyłączył uzwojenie pierwotne induktora do prądu przemiennego. To wydarzenie nie zostało zauważone, a Grove nie był świadomy doniosłości swojego pomysłu dla rozwoju elektrotechniki.

#### 4. Początkowe zastosowania transformatorów jednofazowych

Rozwój transformatorów był związany z wynalezieniem lamp łukowych, a następnie żarowych, oraz z zastosowaniem elektryczności do oświetlania. Zasilanie z jednego źródła wielu lamp wymagało doprowadzenia energii elektrycznej do odbiorników odległych od siebie i zapoczątkowało rozwój elektroenergetyki. Dla zmniejszenia jaskrawości światła lampy łukowej i zapewnienia niezależnej pracy lamp trzeba było znaleźć sposób „podzielenia światła”. Pomysł „podziału” przedstawił we Francji, Rosjanin Paweł Jabłoczkow. Wynalazł on transformator jednofazowy o otwartym rdzeniu i przekładni 1:1, który zasiliał lampę kaolinową, tzw. „świecę Jabłoczkowa”. Należy zauważyć, że w zaproponowanym układzie transformatory nie mogły mieć zamkniętych obwodów magnetycznych. Prąd magnesujący byłby wówczas mały, np. równy tylko 5% prądu znamionowego. Wtedy po przepaleniu się jednej z lamp i rozwarciu obwodu wtórnego napięcie na tymże transformatorze zwiększyłoby się wielokrotnie. Zagadnienie to objaśnił Polak Aleksander Rothert [15].

#### 5. Wtórny generator Gaularda i Gibbsa

W 1882 r. Lucien H. Gaulard i John Dixon Gibbs, francuski wynalazca i jego angielski promotor, uzyskali angielski patent na induktory nazywane przez nich „wtórnymi generatorami”, a także na układ elektryczny zasilany przez szeregowo połączone urządzenia ich pomysłu. Zaproponowany układ nie wnosił nowych idei w porównaniu z przedstawionymi przez wynalazców z lat 1878–1880. Różnica polegała na równoległym, a nie szeregowym połączeniu lamp w obwodach szeregowo łączonych „wtórnych generatorów”. Przy równoległym łączeniu lamp trzeba było zapewnić możliwość regulowania napięcia wtórnego przy zmianie liczby odbiorników. Wynalazcy zaproponowali regulację napięcia za pomocą ruchomych elementów rdzenia – rys. 3.



Rys. 3. Pierwszy wtórny generator zbudowany przez Gaularda i Gibbsa; po lewej stronie są widoczne dwie ruchome kolumny rdzenia częściowo wyciągnięte

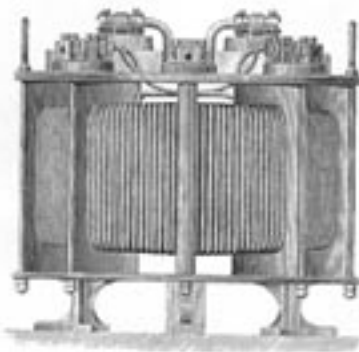
Systemy rozdziału energii z szeregowo połączonymi transformatorami, zaproponowane przez Jabłoczkowa oraz Gaularda i Gibbsa, rozpatrzył Aleksander Rothert, przyszły profesor Politechniki Lwowskiej i jeden z pierwszych

doktorów honorowych z 1925 r. Politechniki Warszawskiej. Rothert wykazał, że przez dobór nasycenia rdzenia można zapewnić prąd pierwotny o praktycznie stałej wartości, niezależnej od obciążenia strony wtórnej [15]. Schüler ocenia, że publikacja Rotherta jest pierwszą pracą o teorii układów połączeń transformatorów [16], wraz z pracami Witolda (Kamila) Rechniewskiego [11 ÷ 14], zapoczątkowała ona polskie prace badawcze w dziedzinie transformatorów.

#### 6. Wynalazki transformatorów na Węgrzech

Pierwszym kierownikiem oddział elektrycznego w fabryce Ganz w Budapeszcie został Károly Zipernowsky; do niego dołączył Miksa Déri i Otto Titus Bláthy. Ta trójka wniosła największy wkład we wczesnym okresie rozwoju transformatorów. W Turynie, po zapoznaniu się z konstrukcją wtórnych generatorów Gaularda i Gibbsa, krytycznie odnieśli się do otwartego obwodu magnetycznego i do szeregowego połączenia uzwojeń pierwotnych. Zbudowali transformatory jednofazowe o zamkniętych obwodach magnetycznych i uzwojeniach równolegle połączonych z prądnicą.

Zaproponowali dwa typy transformatorów. W typie płaszczowym oba uzwojenia są nawinięte toroidalnie, wzajemnie odizolowane i tak ukształtowane, że pole powierzchni toroidu jest kołowe. Wokół uzwojeń jest nanizany wielowarstwowo równomiernie rozłożony drut żelazny tworząc zamknięty rdzeń magnetyczny. W typie rdzeniowym rdzeń jest nawinięty w kształcie toroidu o powierzchni przekroju zbliżonej do kwadratu. Wokół rdzenia są nawinięte uzwojenia o zwojach równomiernie rozłożonych na całym obwodzie. Przy takim rozmieszczeniu uzwojeń ich sprzężenie magnetyczne jest największe z możliwych. Na rys. 4 pokazano transformator rdzeniowy o mocy 7500 W; jego sprawność przy obciążeniu znamionowym, według pomiarów G. Ferrarisa, była równa 95,5% [7].



Rys. 4. Transformator rdzeniowy o mocy 7500 W firmy Ganz

W 1885 r. M. Déri zademonstrował wynalazek w Wiedeńskim Muzeum Technologicznym, na Węgierskiej Narodowej Wystawie w Budapeszcie, a także na Wystawie Wynalazczości w Londynie i podczas podobnej imprezy w Antwerpii. Po wystawach napłynęły do firmy Ganz zamówienia z wielu państw; bardziej niż zamówienia istotnym skutkiem prezentacji był rozgłos w kręgach naukowych i przemysłowych. Obecni na wystawach włoski fizyk Galileo Ferraris,

oraz amerykański przemysłowiec George Westinghouse rozpoznali znaczenie wynalezione transformatora oraz systemu rozdziału energii i stwierdzili, że jest to od lat poszukiwane rozwiązanie zagadnienia przesyłu energii elektrycznej na odległości niedostępne dla układów prądu stałego.

W 1887 r. zaniechano stosowania drutu na rdzenie wykonując je z taśmy stalowej. W patentach z lat 1887–1889 Zipernowsky, Déri i Bláthy opisali udoskonalenia konstrukcji transformatora płaszczonego, polegające m.in. na zastosowaniu wykrojów rdzenia w kształcie litery E oraz litery H, a także rdzeni zwijanych z cienkiej blachy.

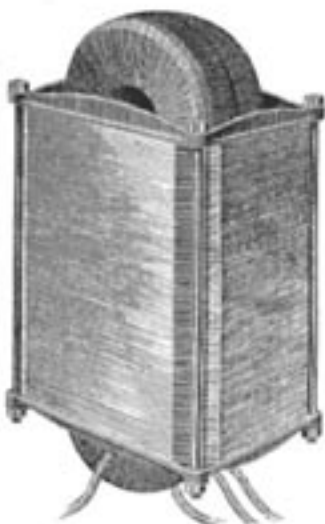
Moc pierwszych transformatorów nie przekraczała ok. 5 kW, a ok. 1890 r. zwiększyła się do 100 kV·A, osiągając pod koniec XIX stulecia w jednostkach trójfazowych – 600 kV·A. Dopuszczalna moc graniczna budowanych w XIX w. transformatorów suchych wynosiła już 3000 kV·A tak, że ok. 1900 r. stało się konieczne zastosowanie chłodzenia olejowego.

## 7. Udoskonalenia konstrukcji transformatorów motywowane technologią produkcji

W celu ułatwienia wykonania uzwojeń w 1844 r. Peter Henri Van der Weyde opatentował w Stanach Zjednoczonych pierścieniowy transformator rdzeniowy z rozciętym rdzeniem wykonanym z wiązki drutów żelaznych. Po wsunięciu cewek uzwojeń przez rozcięty w rdzeniu otwór, umieszczany był w nim masywny klin zamykający obwód magnetyczny.

Budową transformatorów w Stanach Zjednoczonych pierwsza zainteresowała się firma The Westinghouse Electric and Manufacturing Company. Założyciel firmy George Westinghouse zatrudnił w 1884 r. inżyniera Williama Stanley'a, który zaprojektował transformatory z zamkniętym obwodem magnetycznym. W następnym roku został wykonany pierwszy transformator o rdzeniu składanym z wykrojów, znacznie bardziej technologiczny i tańszy niż jednostki produkowane w firmie Ganz – rys. 5. Od 1887 r. Westinghouse wprowadził normalizację transformatorów, zastosował wyposażenie technologiczne, a od 1890 r.

uruchomił produkcję taśmową. Wynikało to m.in. z walki konkurencyjnej z firmą Edison Electric Light Company, w którym Thomas Alva Edison był przeciwny wprowadzaniu prądu przemiennego.

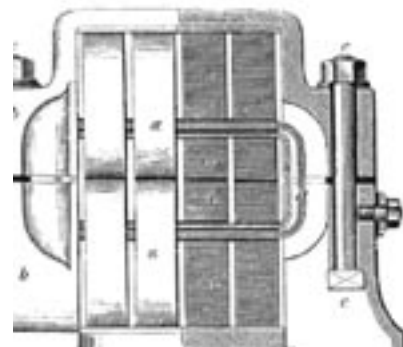


Rys. 5. Transformator Stanley'a o zamkniętym rdzeniu wykonanym z wykrojów

Firma Westinghouse wyrosła na dużego producenta w dziedzinie elektrotechniki, głównie dzięki twórczym innowacjom, jak np. wynalazkom Nicolii Tesli dotyczącym układów dwu- oraz trójfazowych oraz w 1890 r. transformatora bezrdzeniowego wysokiej częstotliwości, wynalezieniu przez Elihu Thomsona w 1889 r. transformatora o stałej wartości skutecznej prądu – niezależnej od mocy odbiorników, zastosowaniu od 1886 r. oleju mineralnego w transformatorach, rozpoczęciu w 1888 r. budowy transformatorów spawalniczych, zastosowaniu elektrotechnicznej blachy krzemowej, a także konstrukcji transformatorów trójfazowych największych wówczas mocy. Krajem, który po Węgrzech w dużym stopniu przyczynił się w XIX w. do rozwoju transformatorów w Europie była Wielka Brytania. Największe w tym zasługi miał Sebastian Ziani de Ferranti, który w brytyjskich patentach z 1885 r. przedstawił propozycję udoskonalenia transformatorów i łączenia ich do pracy równoległej. Opatentował także urządzenie do samodzielnego dołączania kolejnego transformatora do współpracy

Rdzeń transformatora Ferrantiego był wykonany z oddzielnych pakietów zwiniętej walcowanej izolowanej taśmy stalowej o grubości 0,7÷0,8 mm. Między pakietami były szczeliny o szerokości 0,5 cala dla zapewnienia wzmożonego odprowadzania ciepła – rys. 6.

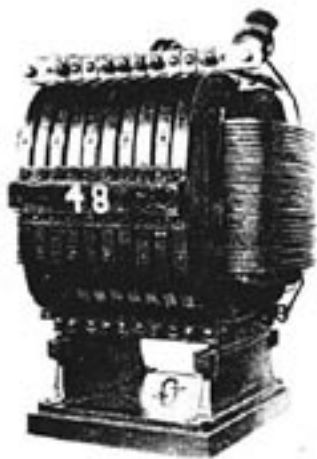
Szczególną uwagę zwracał Ferranti na izolację uzwojeń, stosując płótno oraz papier impregnowane szelakiem. Produkowano pięć typów transformatorów o mocach: 2,5; 5; 10; 15 oraz 25 HP, a od 1890 r. także o mocach: 50; 100 oraz 150 HP.



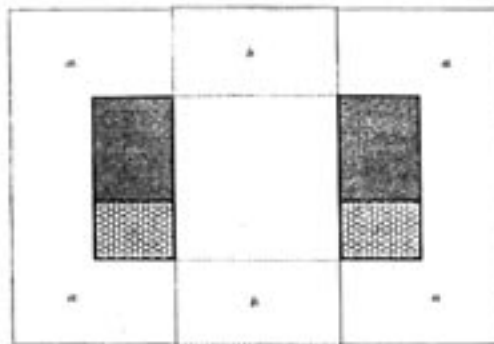
Rys. 6. Konstrukcja transformatora Ferrantiego

W 1886 r. Ferranti wyposażył stację „Grosvenor-Gallery” w centrum Londynu w dwa jednofazowe generatory prądu przemiennego o mocy 400 kW i napięciu 2400 V. Każdy odbiorca miał indywidualny transformator o napięciach 2400/100 V. Zbudował także transformatory o mocy 150 HP podwyższające napięcie z 2500 na 10 000 V oraz transformatory obniżające o napięciach 10 000/2400 V do przesyłu energii linią o długości ok. 12 km do centrum Londynu. Masa transformatora wynosiła ok. 1000 kg i było to w owym czasie szczytowe osiągnięcie – rys. 7.

W tym samym czasie w Anglii budową transformatorów zajmowało się wielu producentów, poszukując konstrukcji najbardziej technologicznych. Należeli do nich m.in. A. Rankin Kennedy, Lowrie-Hall, W. M. Mordey,



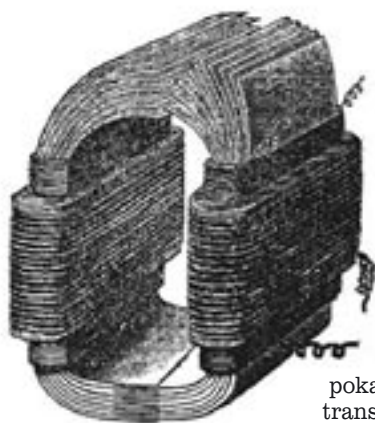
Rys. 7. Transformator o mocy znamionowej 150 HP zbudowany przez Ferrantiego w 1891 roku



Rys. 9. Przekrój transformatora Mordey'a-Webbera

Zmontowany transformator zawieszony pionowo jest przedstawiony na rys. 10.

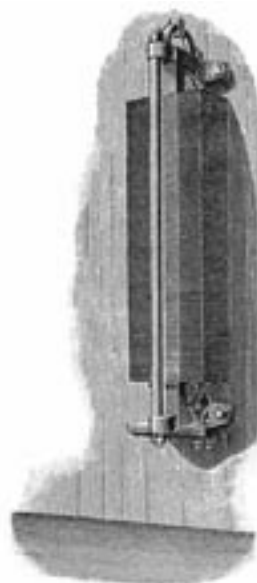
W. H. Snell oraz Gisbert Kapp. Rankin Kennedy uzyskał w 1886 i 1887 r. patenty na transformatory oraz na jedno-fazowe trójprzewodowe układy rozdziału energii.



Rys. 8. Struktura pokazująca metodę budowy transformatora Lowrie-Halla

Pierwsze transformatory z zaplatanym zamkniętym rdzeniem magnetycznym zbudował w Anglii Lowrie-Hall. Rdzeń transformatora był wykonany z pakietów odizolowanych arkuszy blachy zaplecionych na jednym końcu przed włożeniem uzwojeń. Na drugim końcu blachy rdzenia są zaginane i zaplatane po zmontowaniu dwóch par cewek uzwojeń – rys. 8.

Interesującą i łatwą do wykonania konstrukcją rdzenia zaproponowali w 1887 r. W. W. Mordey i Webber z Anglo-American Brush Electric Light Corporation. Ta konstrukcja może być rozpatrywana jako pierwsza próba optymalizacji wymiarów wykrojów – rys. 9. Rdzeń jest składany z wykrojów *aa* z wyciętym symetrycznym prostokątem *bb*. Stosunek zewnętrznych wymiarów wykroju *aa* jest 4:6, natomiast stosunek boków wewnętrznego wykroju *bb* 1:2. Wykroje te są naprzemiennie pakietowane z wykrojami *aa* tworząc rdzeń, wokół którego znajdują się cewki obu uzwojeń. Podane proporcje wymiarów zapewniają jednakowe pole powierzchni przekroju obwodu magnetycznego oraz bezodpadowe wykrawanie elementów rdzenia. Między warstwami wykrojów, na znacznej ich części, występują szczeliny powietrzne równe grubości zastosowanej blachy; dzięki nim chłodzenie rdzenia jest bardzo skuteczne.



Rys. 10. Transformator Mordey'a-Webbera

Transformatory te charakteryzowały się dużą sprawnością w szerokim zakresie obciążenia, przy 1/8 obciążenia znamionowego ich sprawność wynosiła 86,7%, oraz małymi spadkami napięcia.

Pod koniec lat osiemdziesiątych XIX w. ponownie rozważano transformatory o otwartym rdzeniu magnetycznym. Spodziewano się otrzymania płaskiej charakterystyki sprawności, tzn. dużej sprawności przy małych obciążeniach. Trafnie przewidywano, że należy w tym celu budować transformatory o małych stratach w rdzeniu. Tym zagadnieniem zajął się Anglik Georg Forbes proponując transformator z rdzeniem otwartym wykonanym z wiązeki



Rys. 11. „Jeżowy” transformator Swinburne'a

izolowanych drutów żelaznych rozszczepionych na obu końcach tak, jak igły u jeża, rys. 11.

Taki transformator zbudował w 1889 r. James Swinburne; ze względu na kształt wystającej części rdzenia transformator nazwano „jeżowym” („hedgehog” transformer). Transformatory „jeżowe”, głównie ze względu na duży prąd w stanie jałowym, zostały wycofane z eksploatacji.

## 8. Wpływ „bitwy o prąd” na rozwój transformatorów

Od 1886 r. narastały kontrowersje między zwolennikami prądu przemiennego a kręgami optującymi za rozwojem elektroenergetyki na bazie prądu stałego. Zaletą prądu stałego były: akumulatory zdolne gromadzić energię elektryczną, opanowana produkcja silników prądu stałego, stosunkowo niskie napięcie sieci. Za wprowadzeniem prądu przemiennego przemawiała oszczędność miedzi przy przesyłaniu energii elektrycznej pod wysokim napięciem, możliwym dzięki zastosowaniu transformatorów. Dlatego „bitwa o prąd” była nazywana także „walką akumulatora z transformatorem”. Do przeciwników prądu przemiennego i transformatorów należeli w Europie: Anglik Rookes Evelyn B. Crompton oraz Niemiec Ernst Werner von Siemens, a w Ameryce Thomas Alva Edison, zaangażowani w produkcję systemów prądu stałego. Do przeciwników należał także Sir Wiliam Thomson – od 1892 r. Lord Kelvin, który jako doradca budowy elektrowni wodnej na wodospadzie Niagara przestrzegał w 1883 r. przed „gigantycznym błędem” zastosowania prądu przemiennego. Natomiast do zwolenników prądu przemiennego należeli w Europie m.in. M. Dolivo-Dobrowolski, S. Ziani de Ferranti, węgierscy wynalazcy transformatora, a w Ameryce N. Tesla oraz G. Westinghouse. Szczególnie napastliwe były działania T. A. Edisona, który dążył do zakazu przez Kongres Stanów Zjednoczonych stosowania prądu przemiennego.

Pierwsza linia przesyłowa jednofazowa o napięciu 2 kV została zbudowana przez firmę Ganz w 1886 r. w Szwajcarii. W Stanach Zjednoczonych do pierwszego przesyłu prądu przemiennego jednofazowego doszło w 1890 r. linią o długości 2,6 mili, pracującą pod napięciem 3 kV przy częstotliwości 133 Hz. Linia zbudowana przez firmę Westinghouse służyła do przesyłu mocy 100 KM z elektrowni wodnej do huty Gold King Mine w stanie Kolorado.

W Niemczech „bitwa o prąd” osiągnęła szczytowy poziom w 1889 r. w związku z elektryfikacją Frankfurtu nad Menem. Powołana komisja nie doszła do rozstrzygających wniosków i podjęto decyzję o zorganizowaniu w 1891 r. światowej wystawy, na której zostałyby przedstawione różne systemy przesyłu energii. Podczas wystawy nastąpiło wydarzenie przełomowe w rozwoju elektroenergetyki – przesył linią trójfazową energii na odległość 175 km z elektrowni wodnej w Lauffen nad Neckarem do Frankfurtu nad Menem. Po zamknięciu wystawy linia przesyłowa została wyłączona. Przesył linią trójfazową był wielkim sukcesem publicznym, ale technicznie można go uznać tylko jako eksperyment.

Trójfazową elektrownię w Lauffen wykorzystano do zasilania miasta Heilbronn, które jako pierwsze miało

trójfazową siecią rozdzielczą. Wybór systemu zasilania Frankfurtu nastąpił dopiero pod koniec 1893 r.; wybrano system jednofazowy trójprzewodowy o częstotliwości 45 1/3 Hz, a jego realizację powierzono firmie Brown-Boveri ze Szwajcarii. Ta błędna decyzja zaważyła na dużych kosztach trwającej kilkadziesiąt lat modernizacji systemu elektroenergetycznego we Frankfurcie i jego zmiany na trójfazowy o częstotliwości 50 Hz.

Największą inwestycją energetyczną w latach 1889 ÷ 1895 była w Stanach Zjednoczonych elektrownia na wodospadzie Niagara oraz linia przesyłowa do Buffalo. Pod wpływem N. Tesli oraz G. Forbesa, projektanta hydrogeneratorów o mocy 5 000 KM, podjęto nietrafne decyzje o zastosowaniu dwufazowego prądu przemiennego i częstotliwości 25 Hz. Natomiast linia przesyłowa o długości ok. 37 km była trójfazowa i pracowała pod napięciem międzyprzewodowym 11 kV. Dla potrzeb linii powstał nowy rodzaj transformatorów zmieniających liczbę faz z dwóch na trzy; transformatory te wynalazł Amerykanin Charles F. Scott. Zostały zaproponowane także inne układy transformatorów zmieniających liczbę faz. Należy do nich m.in. transformator Le Blanca, mający tę przewagę nad układem Scotta, że można go wykonać stosując rdzeń typowego transformatora trójfazowego.

Należy podkreślić, że nie tylko ze względów technicznych, ale także ekonomicznych „bitwa o prąd” zakończyła się zwycięsko dla prądu przemiennego i dla układów trójfazowych.

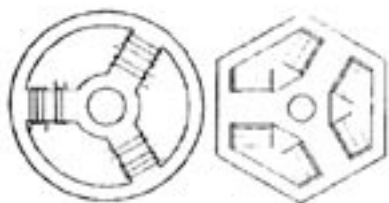
## 9. Początek rozwoju transformatorów trójfazowych

Pierwsze transformatory trójfazowe o obu uzwojeniach połączonych w gwiazdę bez przewodu zerowego zostały wykonane przez firmę Allgemeine Electricitäts Gesellschaft AEG w Berlinie oraz „Maschinenfabrik Oerlikon MFO” w Zurychu i zainstalowane w linii przesyłowej Lauffen-Frankfurt. Były to jednostki olejowe o mocy 150 kV·A oraz suche o mocy 100 kV·A. Mimo trudności technicznych z dopasowaniem elementów układu przesyłowego, potwierdziła się przydatność użytkowa linii trójfazowej. Szczególnie zadawalająca była duża całkowita sprawność energetyczna o wartości powyżej 70%. Był to sukces techniczny, uzyskany wbrew opinii przeciwników prądu przemiennego, którzy przewidywali sprawność na poziomie zaledwie 10%. Był to także osobisty sukces Doliwo-Dobrowolskiego.

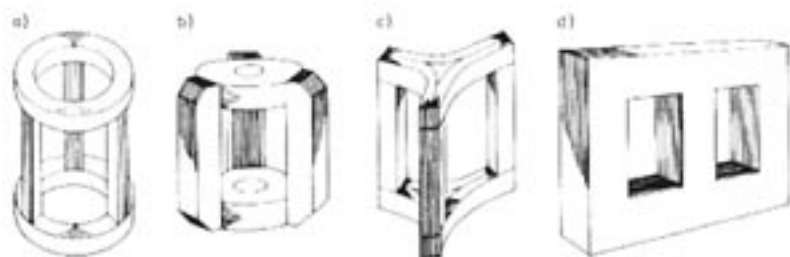
Początkowo, w 1889 r. w układach trójfazowych były stosowane zestawy trzech transformatorów jednofazowych. W następnych latach rozpowszechniły się i do dziś są stosowane, zwłaszcza w USA i Japonii, układy oszczędnościowe złożone tylko z dwóch transformatorów, zapewniające jednak zarówno zasilanie jednofazowe jak i trójfazowe. Należy do nich m.in. układ Vv z otwartym trójkątem obu uzwojeń oraz układ Av z niepełną gwiazdą po stronie wyższego napięcia i otwartym trójkątem po stronie niższego napięcia.

M. Dolivo-Dobrowolski w 1889 r. opatentował struktury transformatorów trójfazowych, rys. 12. Opracował także struktury transformatorów kolumnowych, wykorzystując

okoliczność, że suma trzech fazowych strumieni magnetycznych jest równa zero. Transformatory kolumnowe z jarzmem pierścieniowym – rys. 13a, z jarzmem tarczowym – rys. 13b, oraz z jarzmem gwiazdowym – rys. 13c, były wykonywane do ok. 1902 roku; później produkowane były transformatory tylko z kolumnami w jednej płaszczyźnie oraz z jarzmiami prostoliniowymi – rys. 13d.



Rys. 12. Struktury transformatorów trójfazowych podane przez M. Dolivo-Dobrowolskiego



Rys. 13. Trójfazowe transformatory z rdzeniem kolumnowym i jarzmem: a) pierścieniowym, b) tarczowym, c) gwiazdowym, d) prostoliniowym

Do końca XIX w. budowano transformatory o mocy do ok. 1000 kV·A i o górnym napięciu do 40 kV. Były to w pełni dojrzałe wytwory, wykazujące trwałość zapewniającą pracę przez ponad dwadzieścia lat, o strukturze praktycznie niezmienniej do dziś.

W XX w. rozwój transformatorów był szybki; można go prześledzić np. na przykładzie produkcji firmy Ganz. W roku 1928 zbudowany został transformator o mocy 45 MV·A na 110 kV, w 1962 r. – o mocy 75 MV·A i napięciu 220 kV, w 1970 r. – o mocy 270 MV·A i napięciu 420 kV, a w 1978 r. – o mocy 500 MV·A i napięciu 750 kV.

Rozwój transformatorów w Polsce w XX wieku jest przedstawiony m.in. w pracach [4; 8; 9].

Pierwsze artykuły o transformatorach w języku polskim opublikował T. M. Arlitewicz w 1916 i 1917 r. we Lwowie [1; 2]. Natomiast pierwsze polskie książki o transformatorach opracowali Walenty Kopczyński: *Transformatory i ich zastosowanie* (Wydawnictwo Sp. Akc. „Elektrobudowa”, Łódź 1933) oraz Eugeniusz Jezierski w 1935 r., po II wojnie światowej profesor Politechniki Łódzkiej [11].

## 10. Podsumowanie

Wynaleziony przez Francuza L. H. Gaularda i Anglika J. D. Gibbsa w 1882 r. „wtórny generator” pobudził twórczą inwencję Zipernowsky’ego, Dériego oraz Bláthy’ego z firmy Ganz. To oni w 1885 r. wprowadzili nazwę „transformator” i uruchomili w 1884 r. produkcję transformatorów

jednofazowych. Technologicznie dopracowane transformatory zaprojektował W. Stanley w firmie Westinghouse. Jako pierwszy zastosował rdzenie magnetyczne składane z wykrojów cienkiej blachy oraz w 1887 r. chłodzenie olejowe. Szybki rozwój budowy transformatorów nastąpił po 1885 r. w Wielkiej Brytanii; największe w tym zasługi miał S. Ziani de Ferranti.

Od 1886 r. narastały kontrowersje między zwolennikami prądu przemiennego a kręgami rozwijającymi elektroenergetykę na bazie prądu stałego. „Bitwa o prąd”, nazywana także „walką akumulatora z transformatorem”, zapoczątkowana w Anglii w 1888 r., miała podłoże gospodarcze i zakończyła się zwycięsko dla prądu przemiennego i układów trójfazowych.

W 1889 r. M. Dolivo-Dobrowolski zgłosił do opatentowania struktury transformatorów trójfazowych. Przełomowy dla rozwoju transformatorów był zgłoszony w 1890 i 1891 r. patenty dotyczący rdzenia kolumnowego.

Teorię przyszłych transformatorów zapoczątkował w 1851 r. Herman Helmholtz. Podstawy obliczeń obwodu magnetycznego i siły magnetomotorycznej opracowali bracia J. i E. Hopkinsonowie w 1885 r. Badania nad stratami histerezy w ferromagnetykach rozpoczął ok. 1882 r. Anglik J. A. Ewing, a kontynuował m.in. K. A. R. Steinmetz. Do opracowania praktycznych metod obliczania strat wywołanych w rdzeniu przez prądy wirowe przyczynił się m.in. G. Kapp.

Właściwości oraz wymiary transformatora ulegały poprawie dzięki rozwojowi materiałów ferromagnetycznych. Zmniejszenie i ustabilizowanie strat histerezy pierwsi osiągnęli producenci transformatorów firmy Ganz. Produkcję blachy stalowej krzemowej, dzięki wynalazkom angielskiego metalurga Sir R. A. Hadfielda, uruchomiono ok. 1906 r.

Na trwałość i niezawodność transformatora największy wpływ ma układ elektroizolacyjny. Pierwsze transformatory były chłodzone naturalnym obiegiem powietrza z otoczenia a ich napięcie nie przekraczało 20 kV. Postęp nastąpił po zastosowaniu oleju mineralnego jako chłodziwa i materiału izolacyjnego. Patent za zastosowanie oleju zgłosił David Brooks w Stanach Zjednoczonych w 1878 r.

W XXI w. rozpoczęło się trzecie stulecie pełnienia służby przez to urządzenie. Ze względu na prace nad nadprzewodnictwem wysokotemperaturowym nie jest łatwo przewidzieć, jak rozwinie się dalsza ewolucja transformatorów. Wydaje się, że najbliższych dziesięcioleciach transformatory pozostaną urządzeniami niezastąpionymi i będą skutecznie oraz sprawnie wspierać rozwój systemu elektroenergetycznego oraz coraz szersze korzystanie z dobrodziejstw energii elektrycznej.

## Literatura

- [1] Arlitewicz T. M.: *Transformator jednofazowy trójprzewodowy*, Przegląd Techniczny, 1916, nr 31/32.
- [2] Arlitewicz T. M.: *Wykres zwarcia dla transformatora*, Przegląd Techniczny, 1917, nr 15/16.



- [3] Dąbrowski M.: *Rozszerzenie wyrażenia prawa indukcji elektromagnetycznej*. VI Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki. Gliwice 1995, s. 11–16.
- [4] Dąbrowski M.: *Współdziałanie środowisk naukowych oraz przemysłu maszyn elektrycznych i transformatorów w Polsce*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2003, nr 1–2, s. 6–16.
- [5] Dąbrowski M.: *Początki rozwoju transformatorów*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2005.
- [6] Dolivo-Dobrowolski M.: *Aus der Geschichte des Drehstroms*, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1917 Bd. 38, S. 341–344
- [7] Ferraris G.: *Resultate einiger Experimente mit den Zipernowsky, Déri und Bláthy*. RTZ, 1885, Band 6, S. 427–429.
- [8] Jabłoński M.: *Historia rozwoju transformatora*, Przegląd Elektrotechniczny, 2002, nr 3, s. 69–73.
- [9] Jabłoński M.: *Rola Politechniki Łódzkiej w powstaniu i rozwoju łódzkiego ośrodka transformatorowego*, Przegląd Elektrotechniczny 1975, s. 99–101.
- [10] Jezierski E.: *Transformatory*, Nakładem Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Warszawa 1935.
- [11] Rechniewski W. C.: *Eclairage électrique au moyen des transformateurs Bláthy, Déri et Zipernowsky*, *La lumière électrique*, Paris, vol. XVIII, no. 40, Oct. 1885, pp. 27–29; 42–44.
- [12] Rechniewski W. C.: *Construction des transformateurs*, *La lumière électrique*, Paris, vol. XXIV, 1887, pp. 65–69; 120–123; 259; 272–277; 416–419.
- [13] Rechniewski W. C.: *La théorie géométrique des transformateurs*, *La lumière électrique*, Paris, vol. XXV, 1887, p. 610–615; 639.
- [14] Rechniewski W. C.: *Les transformateurs*, *La lumière électrique*, Paris, vol. XXVII, 1888, p. 573–578; 617–618.
- [15] Rotherth A.: *Theorie der Drosselspulen und Transformatoren für Reihenschaltung von Glühlampen*, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1896, Heft 10, S. 142–144.
- [16] Schüler L.: *Die Geschichte des Transformators*. In: *Geschichtliches Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik*, Bd. 1, Berlin, Springer Verlag 1928.

**Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski**  
 członek korespondent PAN  
 emerytowany profesor  
 Instytutu Elektrotechniki Przemysłowej  
 Politechniki Poznańskiej

Kazimierz Zakrzewski

## Progresja strat w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów i możliwości modelowania<sup>1</sup>

### Streszczenie

W artykule przypomniano genezę strat mocy czynnej w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów. Określono relacje tych strat względem strat podstawowych w uzwojeniach w świetle prawa wzrostu, uzasadniając ich progresję w miarę wzrostu mocy transformatora.

Określono skalowanie parametrów obliczeniowego modelu elektromagnetycznego, zmodyfikowanego i wielkości fizycznych w nim występujących i porównano z wielkościami występującymi w modelu według prawa wzrostu. Wskazano na możliwość wykorzystania opracowanego modelu zmodyfikowanego w obliczeniach projektowych wspomaganych komputerowo.

### 1. Wprowadzenie

Na wstępie warto wspomnieć o najnowszej publikacji M. Dąbrowskiego [1], umożliwiającej prześledzenie konstrukcji transformatorów w początkowym okresie ich rozwoju. Od czasu zaobserwowania przez J. Henry'ego w 1829 wyładowań iskrowych przy rozwieraniu uzwojeń elektromagnesu i słownego opisanie przez M. Faradaya prawa indukcji elektromagnetycznej w 1831 r. oraz sformułowania matematycznego tego prawa przez H. F. H. Lenza w 1832 r w znanej postaci

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Praca była prezentowana na VI Konferencji „Transformatory energetyczne i specjalne” w Kazimierzu Dolnym, 11–13 października 2006.

minęło półwiecze nim pojawiła się nazwa „transformator“. Została ona użyta po raz pierwszy dopiero w 1885 r. w opisach patentowych: Otta Blathy'ego, Miksy Deriego i Karola Zipernowskiego z firmy Ganz w Budapeszcie oraz w artykule W. C. Rechniewskiego [4]. Przypominamy w ten sposób 120-lecie narodzin transformatora, które przypadło w 2005 r.

Rozwój transformatorów w I połowie XX wieku następował bardzo szybko i wydawało się w latach 50. ubiegłego wieku, że nastąpiła pewna stabilizacja. Gwałtowny rozwój energetyki po II wojnie światowej, wzrost napięć i mocy znamionowych jednostek, zwiększenie mocy zwarciowej sieci, spowodowały ponowną intensyfikację badań w zakresie transformatorów, a w szczególności badań wysokonapięciowych i wieloprądowych, związanych ze strumieniami rozproszenia.

Wzrost strumieni rozproszenia i penetracja do stalowych części konstrukcyjnych objawił się w praktyce dodatkowymi stratami obciążeniowymi, które w miarę zwiększania mocy, a przez to gabarytów transformatorów, stanowiły nierzadko pozycję porównywalną ze stratami podstawowymi w uzwojeniach [2, 5]

Zagadnienia pomiarów, obliczania i sposobów zmniejszenia tych strat zajęły kolejne półwiecze, chociaż trzeba przyznać, że są nadal aktualne w naszych czasach. Szczególną rolę odgrywa lokalizacja miejsc, w których mogą pojawić się obszary zwiększonych strat w częściach konstrukcyjnych, powodujące lokalne przegrzania.

## 2. Progresa strat w częściach konstrukcyjnych w świetle prawa wzrostu

Przestrzenny rozkład strumieni magnetycznych w pobliżu części konstrukcyjnych, w wyniku ogromnej różnicy między przenikalnościami magnetycznymi stali i dielektryków, przekształca się w ujęciu lokalnym w fałę elektromagnetyczną płaską, wywołującą głównie straty wiropądowe [2, 3, 9].

Zakładając sinusoidalny przebieg składowej stycznej natężenia pola magnetycznego  $H_{ps}$  na powierzchni stalowej o przenikalności  $\mu_s$  i przewodności elektrycznej  $\gamma_s$ , otrzymujemy wyrażenie na straty powierzchniowe mocy czynnej

$$\Delta P_s = a_p \sqrt{\frac{\pi f \mu_s}{\gamma_s}} \frac{H_{ps}^2}{2} \quad (2)$$

gdzie  $f$  – częstotliwość, współczynnik  $a_p = 1,4-1,6$  [3]

W celu analitycznego ujęcia nieliniowości magnetycznej przyjmujemy paraboliczną zależność charakterystyki magnesowania stali wg wzoru (3) [3, 6, 8], gdzie  $C_1$  stała materiałowa

$$H = C_1 B^n \quad (3)$$

Prawo wzrostu transformatora, będące powiązaniem skali parametrów ze skalą wymiarów liniowych  $m_l$  wymaga wprowadzenia tych skal do naszych rozważań.

Z równania (2) wynika

$$m_H = m_B^n \quad (4)$$

Skala przenikalności

$$m_\mu = m_B^{(1-n)} = m_H^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \quad (5)$$

Skala gęstości powierzchniowej strat

$$m_{\Delta ps} = \sqrt{\frac{m_f m_\mu}{m_\gamma}} m_H^2 \quad (6)$$

Skala strat w określonym obszarze, z uwzględnieniem skali powierzchni  $m_l^2$  równa się

$$m_{ps} = m_{\Delta ps} m_l^2 = m_l^2 m_H^{\left(\frac{3n+1}{2n}\right)} \sqrt{\frac{m_f}{m_\gamma}} \quad (7)$$

Z prawa Ampera, dla skali liczby zwojów  $m_z = 1$  wynika

$$m_H = m_l \quad (8)$$

W założeniu prawa wzrostu  $m_z = m_f = m_\gamma = 1$ .

Z powiązania (6) i (7) wynika

$$m_{ps} = m_l^{\left(\frac{7n+1}{2n}\right)} \quad (9)$$

Jeżeli skala prądu, przy skali gęstości prądu  $m_j = 1$  wynosi

$$m_l = m_l^2 \quad (10)$$

to zależność skali strat od skali prądu wynosi

$$m_{ps} = m_l^{\left(\frac{7n+1}{4n}\right)} \quad (11)$$

Jeżeli skala strat podstawowych w uzwojeniach wynosi  $m_{pu} = m_l^3$  to stosunek skali strat dodatkowych w częściach konstrukcyjnych do strat podstawowych w uzwojeniach jest równy

$$k = \frac{m_{ps}}{m_{pu}} = \frac{m_l^{\left(\frac{7n+1}{2n}\right)}}{m_l^3} = m_l^{\left(\frac{n+1}{2n}\right)} \quad (12)$$

Wprowadzając relację

$$a = \left(\frac{Ps}{Pu}\right)_{m_l=1} \quad (13)$$

możemy sporządzić tabelę iloczynu  $ak$ , który określa progresję strat dodatkowych w odniesieniu do podstawowych w uzwojeniach przez związek

$$\frac{m_{ps}}{Pu} = a \cdot k \quad (14)$$

Tabela. 1. Progresja strat dodatkowych w częściach konstrukcyjnych odniesionych do strat podstawowych w uzwojeniach w zależności od skali wymiarów liniowych transformatora

$m_l$	1	2	3	4	6	8	10
n = 10							
a · k	0,1	0,14	0,17	0,2	0,25	0,28	0,32
	0,2	0,28	0,34	0,4	0,49	0,57	0,63
	0,3	0,42	0,51	0,6	0,74	0,85	0,95
n = 1							
a · k	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0
	0,3	0,6	0,9	1,2	1,8	2,4	3,0

Na podstawie przykładowych wyników obliczeń, podanych w tabeli 1, można wyjaśnić znaczący udział strat dodatkowych, które obserwowano budując w latach 50. XX wieku coraz większe jednostki definiowane w tabeli 1 skalą wymiarów liniowych  $m_l$ .

Zaczęto więc stosować środki ograniczające straty w częściach konstrukcyjnych poprzez ekranowanie elektromagnetyczne i bocznikowanie magnetyczne pokrywy, kadzi, oraz wprowadzanie elementów ze stali niemagnetycznej. Dziś ta praktyka jest stosowana powszechnie, zwłaszcza w jednostkach transformatorowych największej mocy [2, 5].

### 3. Zmodyfikowany model wiroprowodowy

Ówczesne badania, zwłaszcza w byłym Związku Radzieckim, a także w Polsce, przeprowadzono wychodząc z kryteriów modelowania pola elektromagnetycznego i realizowano na modelach fizycznych.

Odsyłając czytelnika do literatury [6, 7, 8] wspomnimy jedynie o tzw. modelu wiroprowodowym na tle modelowania wynikającego z prawa wzrostu.

W modelu wiroprowodowym, wynikającym bezpośrednio z równań Maxwella i tzw. równań konstytutywnych [5, 6, 7], w założeniu  $m_\gamma = m_\mu = 1$ , należy zastosować częstotliwość prądu w uzwojeniach, wynikającą ze skali  $m_f = m_l^{-2}$ . Jednakże, skala natężenia pola magnetycznego  $m_H = m_l$  nie pozwala na zachowanie, w ogólnym przypadku, jednakowego stanu nasycenia magnetycznego w modelu i woryginale.

Autor zaproponował [7] zachowanie skali  $m_H = 1$ , wprowadzając skale gęstości prądu  $m_j = m_l^{-1}$ , co wiąże się w modelach fizycznych z koniecznością intensyfikacji chłodzenia uzwojeń transformatorów.

Porównanie skali parametrów zaproponowanego modelu i modelu wynikającego z prawa wzrostu zostało przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane skale modelowania wielkości fizycznych i parametrów modeli: zmodyfikowanego wiroprowodowego i wynikającego z prawa wzrostu

No	Nazwa wielkości	Oznaczenie skali	Model wiroprowodowy zmodyfikowany	Model wg prawa wzrostu	Uwagi
1	Częstotliwość	$m_f$	$m_l^{-2}$	1	
2	Przenikalność magnetyczna	$m_\mu$	1	1	rdzeń
				1	dielektryk
				$m_\mu(H)$	część konstrukcyjna
3	Przenikalność dielektryczna	$m_\epsilon$	1	1	
4	Przewodność elektryczna	$m_\gamma$	1	1	
5	Gęstość prądu w uzwojeniach	$m_j$	$m_l^{-1}$	1	
6	Natężenie pola magnetycznego	$m_H$	1	1	rdzeń
				$m_l$	dielektryk
				$m_l$	część konstrukcyjna
7	Natężenie pola elektrycznego	$m_E$	$m_l^{-1}$	$m_l$	część konstrukcyjna
			$m_l$	1	dielektryk
			$m_l^{-1}$	1	wzdłuż linii prądu
8	Moc pozorna	$m_s$	$m_l$	$m_l^4$	
9	Rezystancja uzwojeń	$m_R$	$m_l^{-1}$	$m_l^{-1}$	
10	Indukcyjność uzwojeń	$m_L$	$m_l$	$m_l$	
11	Pojemność uzwojeń	$m_C$	$m_l$	$m_l$	
12	Straty w częściach konstrukcyjnych	$m_{ps}$	$m_l$	$m_l \left( \frac{7n+1}{2n} \right)$	
13	Straty podstawowe w uzwojeniach	$m_{pu}$	$m_l$	$m_l^3$	

Jak wspomniano wyżej, model wiroprądowy zmodyfikowany wymaga zasilania obiektu ze źródła podwyższonej częstotliwości, lecz wymagana moc jest znacznie mniejsza niż dla modelu wynikającego z prawa wzrostu. Model fizyczny zmodyfikowany nie doczekał się realizacji ze względu na rozwój komputerów i skierowanie wysiłków badaczy na symulację metodami numerycznymi.

#### 4. Aktualność modelu wiroprądowego zmodyfikowanego w obliczeniach komputerowych

Ideą autora jest zastosowanie w obliczeniach komputerowych, zamiast obiektu rzeczywistego (w naturalnej skali), modelu tego obiektu w zmniejszonej skali wymiarów liniowych. Myśl ta powstała na tle ograniczonej liczby węzłów obliczeniowych, ustalonej w pakietach obliczeniowych do dyskretyzacji geometrycznej płaszczyzny lub przestrzeni rozpatrywanego obiektu. Im skala obiektu będzie mniejsza, tym dokładność dyskretyzacji geometrycznej będzie lepsza. Ze względu na popularność Metody Elementu Skończonego i powszechności dostępu do polowych pakietów obliczeniowych w wykonaniu komercyjnym, postępowanie to może być interesujące. Obliczenia komputerowe mają zawsze charakter wirtualny. Można zatem wprowadzać dowolne dane parametrów materiałowych do obliczeń, pod warunkiem, że będą spełnione wymagania kryterialne modelowania.

Przenosimy w ten sposób rozważania dotyczące modelowania fizycznego na modelowanie matematyczne.

W przypadku zmodyfikowanego modelu wiroprądowego, zachowany zostaje stan nasycenia magnetycznego jak w oryginale, natomiast zwiększona gęstość prądu „nie wymaga fizycznej intensyfikacji chłodzenia”. Dotychczasowe doświadczenia związane z komputerowym wspomaganie projektowania transformatorów, pod kątem rozkładu pola magnetycznego rozproszenia w pobliżu stalowych części konstrukcyjnych, są znaczne, ale jeszcze dalekie od doskonałości. Dotyczy to zwłaszcza rozwiązań trójwymiarowych. W przekrojach dających się odwzorować obszarami dwuwymiarowymi, z uwzględnieniem oddziaływania prądów wirowych, obliczenia te mają dłuższą tradycję [5]. Pozwalają one na wyznaczenie stosunkowo znacznej koncentracji pola magnetycznego w ujęciu lokalnym i obliczenie strat powierzchniowych, wskazujących na ewentualne niebezpieczeństwo lokalnych przegrzań.

Autor wraz ze współpracownikami, rozpoczął wstępne obliczenia testujące z wykorzystaniem przedstawionej idei na przykładzie stosunkowo prostego układu transformatorowego. Uzyskane rezultaty, zawarte w pracy [11], można uznać jako obiecujące.

#### 5. Wnioski

Przedstawiono analityczny dowód, potwierdzający szybszy wzrost strat dodatkowych w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów wobec strat podsta-

wowych w uzwojeniach, w miarę wzrostu mocy, a więc gabarytu jednostek

Zaprezentowano ideę modelowania fizycznego pól i strat rozproszonych w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatora.

Przedstawiono ideę wykorzystania modeli transformatorów w zmniejszonej skali wymiarów liniowych do obliczeń elektromagnetycznych, w ramach wspomaganie komputerowego projektowania.

#### 6. Literatura

- [1] Dąbrowski M.: *Początki rozwoju transformatorów*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2005, stron 87.
- [2] Jezierski E.: *Transformatory*, WNT Warszawa 1975.
- [3] Nejman L. R.: *Powierchnostnyj effekt w ferromagnitnych telach*, GEI Leningrad, Moskwa 1949.
- [4] Rechniewski W. C.: *Eclairage électrique au moyen des transformateurs Blathy, Déri et Zipernowsky*, La Lumiere électrique, Paris, 1885, 18 (4), pp. 27–29, 42–44.
- [5] Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*, WNT Warszawa 1993.
- [6] Zakrzewski K.: *Modelowanie fizyczne pola i strat obciążeniowych transformatora*, Rozprawy Elektrotechniczne, vol. 25, No 2, ss. 401–418.
- [7] Zakrzewski K.: *Modelowanie pola elektromagnetycznego w projektowaniu transformatorów*, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXVIII, No 3 2002, ss. 59–63.
- [8] Zakrzewski K.: *Physical modelling of leakage field and stray losses in steel constructional parts of electrotechnical devices*, Archiv fuer Elektrotechnik, 73, (1990), pp. 319–324.
- [9] Zakrzewski K.: *Analiza pola magnetycznego w masywnym żelazie metodą numeryczną*, Archiwum Elektrotechniki, No 3, 1969, ss. 569–585.
- [10] Zakrzewski K.: *Additional losses in transformer structural parts in the light of growth law*, Proceedings of Six International Conference on Computational Electromagnetics CEM 2006, 4–6 April 2006, Aachen, Germany.
- [11] Zakrzewski K., Tomczuk B., Waindok A.: *Nonlinear scaled models in 3D calculation of transformer magnetic circuits*, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering COMPEL, vol. 25, No 1 2006, pp. 91–101.

**Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski**  
Przewodniczący Komitetu Elektrotechniki PAN  
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych  
Politechniki Łódzkiej

## Konferencja „Transformatory Energetyczne i Specjalne – Rozwiązania, Funkcje, Trendy” Kazimierz Dolny, 11–13 października 2006 r.



W dniach 11–13 października 2006 r. odbyła się w Kazimierzu Dolnym VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Transformatory Energetyczne i Specjalne” rozwiązania, funkcje, trendy. Była to już szósta, organizowana w 2-letnim cyklu, konferencja, obchodząca w tym roku swoje dziesięciolecie. Pierwsza odbyła się bowiem w 1996 r. Jubileusz konferencji zbiegł się w tym roku z jubileuszem 50-lecia istnienia Zakładu Transformatory w Łodzi. Fakt ten został podkreślony specjalnym referatem wprowadzającym, którego autorami byli wieloletni pracownicy ZREW S.A.: Krzysztof Skulimowski i Tadeusz Topolski.

Tegoroczna konferencja, wzorem lat ubiegłych, organizowana była przy współudziale Politechniki Łódzkiej i Instytutu Energetyki O/Transformatorów w Łodzi oraz pod patronatem Polskich Sieci Elektroenergetycznych i Stowarzyszenia Elektryków Polskich Oddziału Warszawskiego i Łódzkiego. Komitet naukowo-programowy stanowili: prof. Michał Jabłoński, prof. Kazimierz Zakrzewski, dr Krzysztof Majer (sekretarz), mgr Andrzej Boroń, dr Krzysztof Domagała, prof. Franciszek Mosiński, mgr inż. Robert Ławski, mgr inż. Jerzy Szastało, dr Ryszard Szczerbanowski oraz prof. Wojciech Urbański. W skład komitetu organizacyjnego weszli pracownicy ZREW S.A.

Tematyka konferencji obejmowała zagadnienia z zakresu transformatorów energetycznych i specjalnych. Zaprezentowano 24 referaty z ośrodków naukowych, przedsiębiorstw reprezentujących energetykę zawodową oraz firm współpracujących z energetyką. Referaty zostały omówione na czterech sesjach:

**I – Nowe konstrukcje** – prowadzący: mgr Adam Zawistowski i prof. Franciszek Mosiński,

**II – Eksploatacja** – prowadzący: prof. Kazimierz Zakrzewski i mgr Inż. Andrzej Boroń,

**III – Modernizacja** – prowadzący: dr Krzysztof Majer i prof. Ryszard Malewski,

**IV – Diagnostyka** – prowadzący prof. Wojciech Urbański i dr Krzysztof Domagała.

Prezentowane zagadnienia wzbudzały duże zainteresowanie i ożywioną dyskusję, która często była kontynuowana w kularach.

Konferencji towarzyszyły stoiska reklamowe, wystawiane przez osiem zainteresowanych firm. Tegoroczna

konferencja cieszyła się wyjątkową popularnością. Uczestniczyło w niej ponad 150 osób. Dla nich właśnie, po dużej dawce wiedzy technicznej, organizatorzy zorganizowali kilkugodzinny spacer po pięknych zaułkach Kazimierza Dolnego. (MS)



Dwa zamki: zamek Janowiec na lewym brzegu Wisły i zamek w Kazimierzu Dolnym na prawym brzegu Wisły (fot. FM)

## Referaty zgłoszone na VI Konferencję Naukowo-Techniczną „Transformatory Energetyczne i Specjalne” w Kazimierzu Dolnym w dniach 11–13 października 2006 roku

### REFERATY WPROWADZAJĄCE

przewodniczący – Mirosław Bednarek

1. Sławomir Partyga: *50 lat Konferencji Transformatorowych w Polsce.*
2. Krzysztof Skulimowski, Tadeusz Topolski: *50 lecie Zakładów Transformatorowych ZREW S.A.*

### NOWE KONSTRUKCJE

przewodniczący – Adam Zawistowski,  
Franciszek Mosiński

1. Bernhard Heinrich, Chris Krause, Kurt Wiek, Ryszard Malewski, Michał Mnich, Jan Popardowski: *Modularny układ izolacyjny odpływu uzwojenia 400 kV transformatora blokowego.*
2. Kazimierz Zakrzewski: *Progresja strat w stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów i możliwości modelowania.*
3. Bronisław Tomczuk, Kazimierz Zakrzewski, Andrzej Waindok: *Obliczanie strumieni magnetycznych w transformatorach 3-fazowych z rdzeniami budowy modułowej.*
4. Krzysztof Majer, Ryszard Szczerbanowski: *Wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na indukcyjność dławika gładzącego.*
5. Jacek Dziura, Dariusz Spałek: *Cechy szczególne transformatorów optymalnych.*

### EKSPLOATACJA

przewodniczący – Kazimierz Zakrzewski,  
Andrzej Boroń

1. Tadeusz Domżański: *Niektóre problemy eksploatacji transformatorów.*
2. Franciszek Mosiński, Bogusław Bocheński, Tomasz Piotrowski: *Śledzenie dynamicznej obciążalności transformatora w systemie on-line.*
3. Jacek Karpiński: *Metoda sztucznych sieci neuronowych w analizach DGA.*
4. Marcei Kaźmierski, Igor Kersz: *System SMT05, nowoczesne narzędzie do kontroli zużywania się transformatorów w eksploatacji.*
5. Jerzy Słowikowski: *Rola wskaźników diagnostycznych w zarządzaniu określoną populacją transformatorów.*

### MODERNIZACJA

przewodniczący – Krzysztof Majer,  
Ryszard Malewski

1. Antoni Pasierb, Artur Szajding: *Monometaliczne rury obustronnie żebrowane – propozycje nowych rozwiązań w konstrukcji chłodnic oleju transformatorowego.*
2. Krystian Kycior: *Zastosowanie automatyki i nowych technologii w procesie odwodnienia stacji transformatorowych.*
3. Andrzej Gaduła: *Remonty, modernizacje czy zakupy nowych transformatorów.*
4. Grzegorz Płuciennik, Adam Ketner: *Rozwój konstrukcji autotransformatorów 160 MVA o przekładni 230/120 kV w fabryce transformatorów w Łodzi.*
5. Eligiusz Walak, Wojciech Zieliński, Adam Ketner, Sabina Domaradzka, Jarosław Galoch: *Automatyczny proces suszenia i impregnacji transformatorów rozdzielczych w fabryce ABB w Łodzi.*
6. Piotr Rożdżyński, Wojciech Urbański: *Zagadnienia aktualne oraz trendy zarządzania jakością w przedsiębiorstwach branży elektrotechnicznej na przykładzie ZREW.*

### TRANSFORMATORY DIAGNOSTYKA

przewodniczący – Wojciech Urbański,  
Krzysztof Domagała

1. Jerzy Wodziński: *Wpływ generatora na kształt piorunowego napięcia probierczego przy próbach układu izolacyjnego transformatorów.*
2. Brian Sparling, Jacques Aubin, Mirosław Kuchta: *Ocena zawartości wody w papierze izolującym transformatorów.*
3. Adam Ketner, Sławomir Kłyż: *Poziom intensywności wyładowań niezupełnych – kryterium oceny izolacji transformatorów energetycznych.*
4. Adam Ketner: *Wymagania i próby wytrzymałości elektrycznej transformatorów energetycznych olejowych - uwagi i komentarze do normy PN-EN 60076-3:2002.*
5. Ivo Pinkiewicz, Zbigniew Szymański: *Izolatory przepustowe wysokiego napięcia, awarie, diagnostyka, ewidencja.*
6. Jarosław Dałek, Ilona Glińska, Janusz Ostrowski: *Urządzenia do ciągłego monitorowania transformatorów pracujących w sieciach energetycznych najwyższych napięć, w szczególności do pomiarów przepięć oraz do badania stanu izolatorów przepustowych z transmisją wyników do nadzorującego systemu komputerowego.*



B. Stefanowskiego 18/22  
90-924 Łódź  
tel.: +48 (+42) 631-25-71, 631-25-81  
fax: +48 (+42) 636-23-09  
e-mail: imsi@p.lodz.pl  
http://www.imsi.p.lodz.pl

## HISTORIA I STAN OBECNY

Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych wywodzi się z Katedry Maszyn Elektrycznych, powołanej do życia w czerwcu 1945 r. W historii Instytutu Mechatroniki i Systemów Informatycznych można wyodrębnić cztery okresy działalności:

- lata 1945 – 1970 – Katedra Maszyn Elektrycznych i Transformatorów,
- lata 1970 – 1984 – Instytut Transformatorów, Maszyn i Aparatów Elektrycznych,
- lata 1985 – 2002 – Instytut Maszyn Elektrycznych i Transformatorów,
- od 2002 – Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych.

Obecnie Instytut ten zaliczany jest do największych Instytutów Wydziału – zatrudnia dwóch profesorów tytularnych na stanowisku profesora zwyczajnego, pięciu doktorów habilitowanych na stanowisku profesora nadzwyczajnego, jednego doktora habilitowanego na stanowisku adiunkta, dziewięciu doktorów, czterech magistrów inżynierów na etatach naukowo-dydaktycznych i dziesięciu pracowników na etatach technicznych.

## DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWA

Tematyka prac naukowych:

1. Teoria, budowa i projektowanie oraz badania i eksploatacja:  
maszyn elektrycznych, elektromaszynowych elementów automatyki, transformatorów energetycznych i specjalnych.
2. Systemy i elementy mechatroniczne:  
analiza i projektowanie mikrostruktur członów wykonawczych, symulacja i optymalizacja mikroczujników – MEMS, programowalne układy napędowe.
3. Systemy projektowania i strojenia rozproszonych baz danych oraz hurtowni danych w tym:  
zagadnienia związane z wykorzystaniem zaawansowanych systemów i aplikacji baz danych, projektowanie „inteligentnych” środowisk lingwistycznej analizy znaczeniowej tekstu.

Wyniki badań z omawianej tematyki były publikowane zarówno w czasopismach krajowych, jak i zagranicznych. Wygłoszono również wiele referatów na konferencjach międzynarodowych. W latach 2000-2006 pracownicy Instytutu opublikowali 24 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej oraz 8 artykułów w czasopismach PAN, 7 monografii, ponadto wygłoszono 120 referatów na międzynarodowych konferencjach i zamieszczonych w materiałach konferencyjnych. W latach 1993-2004 zrealizowano w Instytucie 17 projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych.

## WSPÓŁPRACA Z PRZEMYSŁEM

1. OTIS United Technologies – USA – projekt bezstykowego magnetostrykcyjnego czujnika momentu, stanowisko badawcze do badania maszyn wyciągowych.
2. United Technologies Research Center – USA – minimalizacja drgań i hałasu w maszynach wyciągowych.
3. Crompton Greaves LTD Bombaj – Indie – analiza drgań magnetycznych struktury transformatora.
4. ABB sp z o.o. Łódź – Polska – ocena zagrożeń układu izolacyjnego autotransformatora od przepięć rezonansowych wewnętrznych generowanych przez napięcia oscylacyjne na zaciskach liniowych.
5. Mazowieckie Zakłady Rafineryjne „Petrochemia Płock, S.A. – Polska – wykonanie badań i obliczeń dotyczących grup silników elektrycznych 6kV w celu określenia parametrów dla nastawiania zabezpieczeń cyfrowych.
6. Zakłady Wytwórcze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów „EMIT” S.A. Żychlin – Polska – analiza częstotliwościowa radialnych sił magnetycznych oraz drgań własnych silnika indukcyjnego.

## KURSY I SZKOLENIA

- AutoCad
- Systemy Siemens
- 3ds max

## AUTORYZOWANE CENTRA EDUKACYJNE I UMOWY PARTNERSKIE

Instytut ma podpisane umowy, dzięki którym otrzymał, na preferencyjnych warunkach, oprogramowanie i sprzęt z prawem wykorzystywania w badaniach naukowych i dydaktyce oraz wydawania Międzynarodowych Certyfikatów:

- grafiki komputerowej, 3ds max – AUTODESK, USA (jedyne centrum w Polsce),
- systemów CAD, AUTODESK, USA,
- systemów baz danych, ORACLE, SAS, Microsoft,
- komputerowego modelowania i syntezy pól fizycznych – Vector Fields, UK (jedyne centrum w Polsce)



Laboratorium systemów napędowych firmy Siemens



Laboratorium grafiki komputerowej

# Czy stać Cię na kompromis w sprawach bezpieczeństwa?!



## Wskaźnik VisiVolt™ do wewnętrznych i napowietrznych systemów ŚN



Co powoduje wypadki elektryczne? Chwila nieuwagi w czasie pracy monterów? Jedna faza nie odłączona z nieprzewidzianej przyczyny? Pomyłka przy wymianie informacji między pracownikami? Przyczyna za każdym razem jest inna, ale zawsze coś zawodzi. Nie ma możliwości całkowitego uniknięcia błędów gdy człowiek używa sprzętu technicznego. Istnieje jednak możliwość aby ostrzec

obsługę przed niebezpieczeństwem gdy jeszcze nie jest za późno. Wskaźniki VisiVolt™, w których zastosowano unikalny wyświetlacz LCD czuły na promienne pole elektryczne mogą być zamontowane na stałe na szynach i przewodach każdego nieekranowanego systemu średniego napięcia. Po zainstalowaniu uczynią one system bezpieczniejszym poprzez uwidocznienie faktu obecności napięcia.

**Pomyśl dwa razy. W sprawach bezpieczeństwa nie idź na kompromis.**

[www.abb.com/mediumvoltage](http://www.abb.com/mediumvoltage) E-mail: [passvi.plabb@pl.abb.com](mailto:passvi.plabb@pl.abb.com)