

MAREK DUDZIK*

WADY KONSTRUKCYJNE TRANSFORMATORÓW
I TOWARZYSZĄCE IM ZJAWISKA FIZYCZNE
NA PRZYKŁADZIE JEDNOFAZOWEGO,
WIELOUZOJENIOWEGO TRANSFORMATORA
TRAKCYJNEGOTHE MONO PHASE, 22 WINDINGS, 27 kVA POWER,
TRACTION TRANSFORMER AS THE EXAMPLE
OF THE TRANSFORMER WITH CONSTRUCTION DEFECTS.
THE DEFECTS OCCURRING PHYSICAL PHENOMENA

Streszczenie

W artykule zaprezentowano nietypowe zjawiska występujące podczas pracy laboratoryjnego, jednofazowego, wielouzojeniowego transformatora trakcyjnego. Fenomeny te związane są z występowaniem wady konstrukcyjnej urządzenia, która najprawdopodobniej wynika z zastosowania magnetycznie przewodzących materiałów niektórych elementów konstrukcji wewnątrz urządzenia. Jednocześnie nie wyklucza się wykorzystania niskiej jakości impregnatu zlokalizowanego pomiędzy pakietami blachy transformatorowej badanego obiektu. Przedstawiono zmodyfikowany zastępczy schemat transformatora, oparty na klasycznym modelu transformatora dwuuzwojeniowego. Schemat ten pozwala zidentyfikować elementy, dzięki którym praca opisywanego urządzenia może zostać zasymulowana.

Słowa kluczowe: transformator trakcyjny, transformator wielouzojeniowy, wady konstrukcyjne transformatorów

Abstract

The paper shows what problems and different types of phenomena can be found in case when transformers weren't properly constructed. In the article there is presented mono phase, 22 windings, 27 kVA power, traction transformer with construction defect. The defect probably comes from the beams which should support transformers construction, because they are probably made of magnetically conductive materials. The transformers unusual phenomena which come from the defect were shown and described, in addition the cause of the phenomena is explained. In the conclusion modified model of T type equivalent scheme vertical branch, which comes from no load state occurring in the transformer phenomena is shown. The model can be used to create equivalent scheme which might be able to model the transformer later.

Keywords: traction transformer, multiwinding transformer, transformer defects

* Mgr inż. Marek Dudzik, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

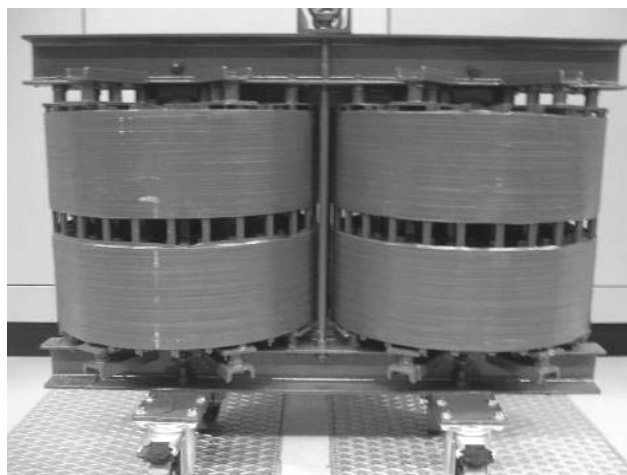
1. Wstęp

Transformatory wielouzwojeniowe stanowią istotną gałąź w zastosowaniach przemysłowych. Wykorzystywane są m.in. w branży związanej z transportem elektrycznym, jak również w branży energetycznej przy przesyłaniu i rozdzielaniu energii elektrycznej.

Jednym z niepożądanych zjawisk występujących w tych urządzeniach, dokładniej ujmując w ich elementach przewodzących magnetycznie, jest fenomen powstawania prądów wirowych [3]. Prądy te wywołują straty o mocy $R_{Fe} i_w^2$, czego skutkiem jest m.in. obniżenie sprawności maszyny [1]. W związku z powyższym obwód magnetyczny nie może stanowić jednolitej masy. Jest on wykonany z tzw. blachy transformatorowej, która należy do grupy materiałów magnetycznie miękkich [2].

2. Opis badanego urządzenia

Badany jednofazowy, wielouzwojeniowy transformator trakcyjny zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Jednofazowy laboratoryjny transformator trakcyjny 22-uzwojeniowy o mocy 27 kVA [4]

Fig. 1. Mono phase, 22 windings, 27 kVA power, traction transformer

Jest to laboratoryjny transformator 22-uzwojeniowy znajdujący się w Hochschule für Technik und Architektur, we Freiburgu w Szwajcarii. Urządzenie to jest jednostką o mocy 27 kVA, zaprojektowaną dla dwóch rodzajów sieci: 400 V/50 Hz, 250 V/16,7 Hz. Transformator ten posiada cztery różne grupy uzwojeń współśrodkowych [6]:

1. Uzwojenia strony pierwotnej:

- Wysokiego napięcia (HT – *High-voltage windings*). Posiadają one 240 zwojów, są zaprojektowane w taki sposób, aby mogły pracować dla dwóch różnych rodzajów sieci zasilania: 400 V/50 Hz, 250 V/16,7 Hz. Nominalna wartość prądu poszczególnych uzwojeń to: $I_n = 16,875$ A.

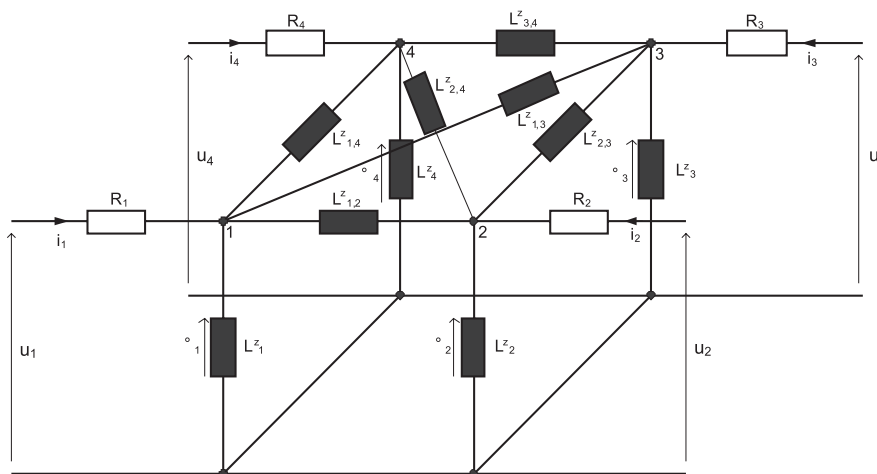
2. Uzwojenia strony wtórnej:

Uzwojenia strony wtórnej, które spełniają tę samą funkcję zostały rozdzielone na dwie części. Celem tego zabiegu jest otrzymanie podobnego poziomu wartości napięcia dla różnego rodzaju sieci zasilającej AC.

- Pomocnicze (ZSS – *Auxiliary windings*). Są to uzwojenia stosowane najczęściej do zasilania obwodów oświetlenia i ogrzewania. Obydwie grupy uzwojeń zostały zaprojektowane na nominalną wartość napięcia 25 V i moc pozorną 500 VA. Nominalna wartość prądu poszczególnych uzwojeń to $I_n = 20$ A.
- Trakcyjne (Tr – *Traction windings*). W praktyce zazwyczaj stanowią one źródło zasilania dla przekształtników statycznych w lokomotywie. Obydwie grupy uzwojeń zostały zaprojektowane na nominalną wartość napięcia 100 V i moc pozorną 6 kVA. Nominalna wartość prądu poszczególnych uzwojeń to $I_n = 60$ A.
- Filtru (*Filter winding*). Dla sieci odpowiadającej częstotliwości 50 Hz zostały one zaprojektowane na nominalną wartość napięcia 50 V i moc pozorną 250 VA. Nominalna wartość prądu poszczególnych uzwojeń to: $I_n = 10$ A.

3. Opis metody pomiarowej badanego urządzenia

Prezentowany w artykule transformator nie jest transformatorem typowym, albowiem odróżnia go od przedstawicieli jego rodziny wiele niespotykanych powszechnie zjawisk, które zostały przedstawione w dalszej części artykułu. Należy jednak dodać, że w związku z tym, iż jest to transformator wielouzwojeniowy, w celu określenia jego parametrów należy dokonać identyfikacji elementów wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora [9, 11]. Przykładowy schemat zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Wielowrotnikowy schemat zastępczy transformatora czterouzwojeniowego

Fig. 2. Multi-port equivalent scheme for four windings transformer

Identyfikacja elementów gałęzi poprzecznych („ L_i^Z ”) odbywa się za pomocą pomiarów w stanie jałowym transformatora. Natomiast rozpoznania elementów gałęzi horyzontalnej można dokonać za pomocą pomiarów obiektu w stanie zwarcia wszystkich portów transformatora, z wyjątkiem zacisków, do których zostało przyłożone napięcie zasilania. Szerszy opis zaprezentowanego schematu wraz z przykładowymi metodami jego identyfikacji został przedstawiony w pozycjach literatury [10, 11].

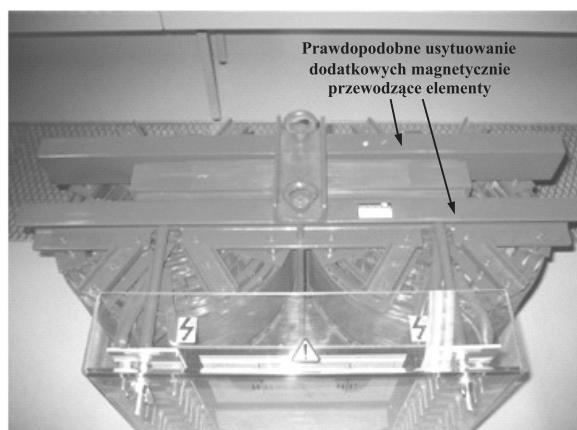
4. Wyniki pomiarów

4.1. Pomiary w stanie jałowym

Pomiary dla wartości napięcia znamionowego poszczególnych uzwojeń i częstotliwości 50 Hz wykazały, że zazwyczaj stosowane metody obliczeniowe oparte na wielowrotnikowych schematach zastępczych transformatora nie mogą być użyte [4]. Obliczenia te wynikają z założenia wartości kąta przesunięcia fazowego $\varphi \approx 90^\circ$ w zastępczym obwodzie elektrycznym urządzenia dla stanu jałowego.

Podczas pomiarów średnia wartość kąta mocy wyniosła $\varphi \approx 26,5^\circ$. Sugeruje to, że transformator ten w stanie nieobciążonym ma bardziej rezystancyjny niż indukcyjny charakter odbiornika [7]. Na dodatek wartość mierzonego kąta ulega zmianie dla różnego rodzaju uzwojeń. Wyjaśnienie tego zjawiska może być związane z występowaniem prądów wirowych wewnątrz masywnych elementów konstrukcyjnych transformatora.

W celu potwierdzenia tej hipotezy dokonano dokładnych oględzin transformatora i na podstawie powyżej zaobserwowanych wyników pomiarowych stwierdzono, że urządzenie to może posiadać dodatkowe magnetycznie przewodzące elementy, które zostały zamontowane podczas procesu konstrukcyjnego. Istnieje również prawdopodobieństwo nieprawidłowego pokrycia impregnatu izolującego blachy transformatorowe, a także jego niewystarczających własności elektrycznych. Przypuszczalne położenie elementów zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Przypuszczalne położenie dodatkowych magnetycznie przewodzących elementów transformatora zamontowane podczas procesu konstrukcyjnego

Fig. 3. Transformers support construction elements, probably made of magnetically conductive materials

Wykonane ponadto zostały pomiary, których celem było potwierdzenie istnienia dodatkowych magnetycznie przewodzących elementów badanego urządzenia.

Pomiary te zostały oparte na związku matematyczno-fizycznym (1) [6]

$$\frac{U_0}{f} = 4,44 \cdot z \cdot \Phi_m = \text{const} \quad (1)$$

gdzie:

- U_0 – wartość skuteczna przemiennego napięcia zasilania w stanie jałowym,
- f – częstotliwość,
- z – liczba zwojów uzwojenia mierzonego,
- Φ_m – amplituda strumienia magnetycznego.

Na podstawie którego w przypadku teoretycznie poprawnie skonstruowanych transformatorów obliczony opór związany ze stratami w żelazie dla kolejnych wartości napięcia U_0 i odpowiadających im częstotliwości powinien być stały lub bliski stałej wartości [10].

Tabela 1

Wyniki pomiarów stanu jałowego transformatora dla stałego stosunku U_0/f

Pomiary uzwojenia wysokiego napięcia (HT winding measurements)				Pomiary uzwojenia trakcyjnego (Traction winding measurements)			
U_0 [V]	f [Hz]	U_0/f [$\sqrt{\text{Hz}}$]	R_{Fe} [Ω]	U_0 [V]	f [Hz]	U_0/f [$\sqrt{\text{Hz}}$]	R_{Fe} [Ω]
20,42	5	4	704,96	5,16	5	1	37,000
40,00	10	4	1068,91	9,97	10	1	56,869
59,85	15	4	1389,24	15,10	15	1	76,544
65,28	16,667	4	1452,91	16,66	16,667	1	81,860
79,75	20	4	1640,84	20,00	20	1	93,550
100,00	25	4	1858,67	24,90	25	1	107,417
119,77	30	4	2057,18	30,20	30	1	121,209
140,40	35	4	2242,17	35,20	35	1	131,954
160,70	40	4	2401,21	40,00	40	1	142,474
179,70	45	4	2537,84	45,10	45	1	152,560
200,00	50	4	2662,71	49,80	50	1	160,485

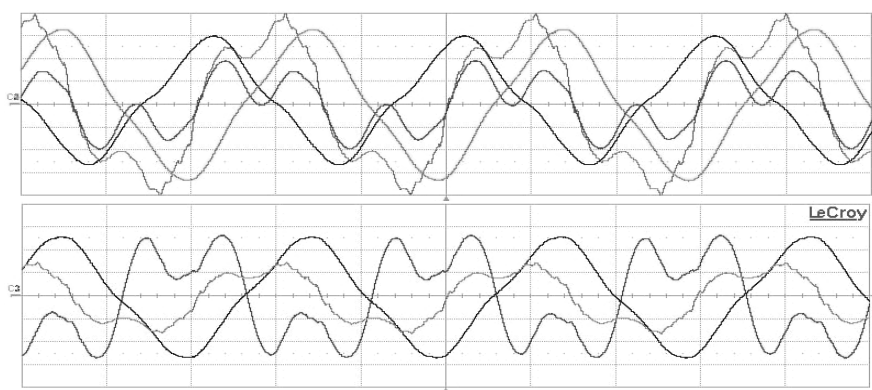
W tabeli 1 przedstawiono przykładowo wybrane wyniki pomiarów związanych z równaniem (1). Z lewej strony tabeli zostały zaprezentowane rezultaty otrzymane z pomiarów jednego z uzwojeń strony pierwotnej transformatora. Natomiast po prawej stronie tabeli znajdują się wyniki związane z jednym z najbardziej istotnych uzwojeń jego strony wtórnej – pomiary uzwojenia trakcyjnego. Pomiary dla uzwojenia wysokiego napięcia zostały wykonane dla stosunku $U_0/f = 4$. Natomiast dla uzwojenia trakcyjnego stosunek ten wyniósł 1. Z tabeli można wywnioskować, że opór związany ze stratami w żelazie nie oscyluje wokół stałej wartości, na dodatek owa stała wartość nie istnieje. Nie trudno również dostrzec, że R_{Fe} wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości f . Rezultaty te potwierdzić mogą występowanie wewnątrz konstrukcji transformatora dodatkowych magnetycznie przewodzących elementów, przy czym istnieje także prawdopodobieństwo, że straty te wynikać mogą ze słabej jakości wykorzystanego impregnatu czy też nie właściwego nałożenia blach transformatorowych [5].

Dzięki powyżej otrzymanym wynikom można uzasadnić obniżenie wartości mierzonego kąta mocy. Fenomen ten związany jest z występowaniem zjawiska prądów wirowych wewnątrz najprawdopodobniej przedstawionych na rys. 3 elementów konstrukcyjnych urządzenia czy też zachodzącego tożsamego zjawiska pomiędzy nieprawidłowo zaizolowanymi blachami transformatorowymi.

4.2. Pomiary w stanie zwarcia

W związku z tym, że opisywane urządzenie jest transformatorem multisystemowym, zaprojektowanym m.in. do pracy przy zasilaniu obiektu prądem przemiennym o częstotliwości 16,7 Hz, 50 Hz, pomiary w stanie zwarcia zostały wykonane dla obydwu z nich.

Pomiary dla częstotliwości 16,7 Hz zostały wykonane dwukrotnie z użyciem różnego rodzaju urządzeń (oscylloskopy, elektroniczne urządzenia do pomiaru mocy). Źródłem napięcia zasilania była laboratoryjna maszyna synchroniczna [4]. Podczas pomiarów z zastosowaniem oscylloskopów charakterystyki czasowe sygnałów napięciowych oraz prądowych były znacznie zniekształcone. Najprawdopodobniej jest to wynikiem potwierdzającym istnienie dodatkowych, magnetycznie przewodzących materiałów. Przykładowe przebiegi napięcia i prądów w zwartych uzwojeniach transformatora zaprezentowano na rys. 4 [4].



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki czasowe napięcia i prądów, podczas pomiarów w stanie zwarcia dla częstotliwości 16,7 Hz. Kolor najjaśniejszy – przebieg napięcia zasilania, pozostałe kolory – przebieg prądu płynącego w poszczególnym zwartym uzwojeniu

Fig. 4. Exemplary supply voltage and currents in short-circuited windings time characteristics taken from oscilloscopes during second short-circuit measurements. Plainest color – supply voltage time characteristic, rest colors – currents in short-circuited windings time characteristics

Pomiary dla częstotliwości 50 Hz także zostały wykonane dwukrotnie z użyciem różnego rodzaju urządzeń (oscylloskopy, elektroniczne urządzenia do pomiaru mocy). Podczas pomiarów transformator był zasilany z sieci przemysłowej. Charakterystyki czasowe w trakcie pomiarów z użyciem oscylloskopów były również zniekształcone, aczkolwiek miara zniekształceń napięciowych i prądowych była znacznie mniejsza. Potwierdziła to także wykonana analiza FFT.

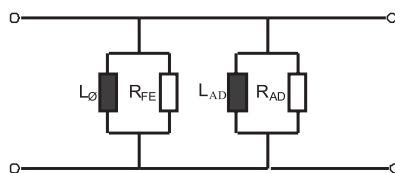
Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów zostały przeprowadzone obliczenia zgodne z powszechnie dostępną, ogólną teorią transformatorów wielouzwojeniowych [9–11]. Kalkulacje zostały przeprowadzone dla wielkości odczytanych z pomiaru i dla ich pierwszej harmonicznej. Otrzymane rezultaty w postaci obliczonych macierzy indukcyjności podłużnych wielowrotnikowego schematu zastępczego badanego transformatora nie były zgodne z teorią. Macierze indukcyjności były niesymetryczne, dodatkowo niesymetryczne elementy macierzy w niektórych przypadkach posiadały wartości o różnych znakach.

5. Podsumowanie

Zaprezentowany w powyższej publikacji transformator jest przykładem urządzenia, które ze względu na wadę konstrukcyjną nie może być opisane za pomocą ogólnej teorii transformatorów wielouzwojeniowych. Jednak w przypadku odpowiednich modyfikacji wielowrotnikowego schematu zastępczego istnieje możliwość jego zamodelowania.

Wszystkie zaprezentowane w artykule nietypowe zjawiska badanego urządzenia mogą zostać wyjaśnione i zinterpretowane dzięki najprawdopodobniej występowaniu wewnątrz konstrukcji transformatora dodatkowych magnetycznie przewodzący elementów (rys. 3). Istnieje prawdopodobieństwo, że niska wartość kąta mocy w stanie jałowym wynikać może także ze słabej jakości (pod względem własności elektrycznych) wykorzystanego impregnatu czy też niewłaściwego nałożenia blach transformatorowych. Powyższe podejrzenie jest skutkiem pochodzącym z wykonanych pomiarów innych transformatorów producenta opisywanego w artykule urządzenia. Transformatory te prezentowały m.in. specyficzne zachowanie, takie jak: wzrost kąta mocy wraz ze wzrostem wartości skutecznej napięcia transformatora w stanie jałowym. Wynikać to może ze specyficznych właściwości materiału użytego na blachy transformatorowe.

Wspomniane wcześniej modyfikacje schematu zastępczego transformatora mają na celu uwzględnienie wpływu zjawisk występujących w obiekcie, co w kolejnym stadium znajdzie odzworowanie w wynikach pochodzących z jego modelu matematycznego. Przykładowo, zjawisko wynikające z występowania stosunkowo dużej wartości $\cos(\varphi)$ w stanie jałowym może zostać zamodelowane dla transformatorów dwuuzwojeniowych za pomocą czwórnika, w którego gałęzi poprzecznej znajduje się równoległe połączenie układów elementów pasywnych. Ponadto każdy z układów stanowi odpowiednik zjawisk fizycznych występujących wewnątrz transformatora. Przykładowy opisywany schemat czwórnika pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Zmodyfikowana postać gałęzi poprzecznej klasycznego schematu zastępczego transformatora w postaci czwórnika, uwzględniająca zjawisko spadku kąta mocy w stanie jałowym badanego urządzenia

Fig. 5. T type equivalent scheme horizontal branch, which corresponds to the considered traction transformer physical phenomenon

Jak nie trudno zauważyć gałąź poprzeczna czwórnika (rys. 5) została rozdzielona na dwa podukłady. Podukład z lewej strony stanowi odpowiednik gałęzi poprzecznej klasycznego schematu zastępczego transformatora, co oznacza że wielkości L_{μ} , R_{Fe} odpowiadają mierze parametrom poprawnie skonstruowanego urządzenia i są związane z teoretycznie prawidłowo zaizolowanymi od siebie pasami blachy transformatorowej [6]. Natomiast podukład z prawej strony jest związany z występowaniem błędów konstrukcyjnych transformatora. Stanowi on równoległe połączenie elementów L_{AD} , R_{AD} , których celem jest odzwierciedlenie występowania wewnątrz konstrukcji transformatora dodatkowych magnetycznie przewodzących materiałów, jak również możliwych błędów dotyczących izolacji pakietów blach obiektu. Jednocześnie można zauważyć, że dzięki zastosowaniu równoległego połączenia opisywanych podukładów, w przypadku gdy posiada się analogiczny poprawnie skonstruowany obiekt, można ocenić ilościowo stopień badanej wady konstrukcyjnej i jej wpływ na prawidłową pracę urządzenia.

Na zakończenie należy dodać, że elementy dodatkowe L_{AD} , R_{AD} nie muszą być elementami o liniowych charakterystykach. Albowiem funkcje je opisujące związane są z wieloma nietypowymi wadami konstrukcyjnymi, a także materiałowymi, które w ogólnym przypadku stanowią mogą charakterystyki nieliniowe.

6. Zakończenie

W artykule zaprezentowano nietypowe zjawiska występujące podczas pracy laboratoryjnego, jednofazowego, wielouzwojeniowego transformatora trakcyjnego. Przedstawiono hipotezę występowania fenomenów oraz przyczyny jej sformułowania na podstawie wyników pomiarów urządzenia. Zaprezentowano również wstępną metodę identyfikacji zjawisk występujących w trakcie pracy urządzenia w stanie jałowym.

W kolejnych krokach planuje się poszerzenie zakresu badań identyfikacyjnych obiektu, na potrzeby których zostaną zmodyfikowane czy też utworzone schematy zastępcze urządzenia pozwalające na pełne rozpoznanie obiektu. W ostatecznej formie doprowadzi to do stworzenia symulacji jego pracy.

Literatura

- [1] Bajorek Z., *Teoria maszyn elektrycznych*, PWN, Warszawa 1982.
- [2] Brailford F., *Materiały magnetyczne*, PWN, Warszawa 1964.
- [3] Cholewicki T., *Elektrotechnika teoretyczna*, WNT, Warszawa 1967.
- [4] Hayek J., *Parameters analysis of multi-windings traction transformers*, praca doktorska, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Kraków 2002.
- [5] Jeziński E., Gogolewski Z., Kopczyński Z., Szmit J., *Transformatory. Budowa i projektowanie*, wyd. 2, WNT, Warszawa 1963.
- [6] Jeziński E., *Transformatory*, t. 1, 2, PWN, Warszawa 1965.
- [7] Krakowski M., *Elektrotechnika teoretyczna*, t. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
- [8] Kurdziel R., *Podstawy elektrotechniki*, WNT, 1965.

- [9] Sobczyk T., *O pewnej obwodowej reprezentacji magnetycznie sprzężonych cewek*, Materiały Międzynarodowej Konferencji „Seminarium Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów”, IC-SPETO 2003, t. 2, 493-496.
- [10] Sobczyk T.J., *Multi-port equivalent scheme of three-phase power transformers*, Materiały Międzynarodowej Konferencji Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC-SPETO 2007.
- [11] Sobczyk T.J., *Schematy zastępcze wielo-uzwojeniowych transformatorów jednofazowych*, Warsaw University of Technology, Proc. of Int. Conf. SME, 2004, 452-456.