

Ireneusz Chrabąszcz, Marek Dudzik, Janusz Prusak

Transformatory trakcyjne – wybrane trudności identyfikacji obiektu

W Polsce elektryfikację linii kolejowych na PKP rozpoczęto w latach 30. XX w. [6]. Do zasilania taboru zastosowano napięcie stałe o wartości nominalnej 3000 V. Był to sposób/system, który wówczas uważano za najlepszy i z tego powodu wdrażano go tam, gdzie wówczas rozpoczynano elektryfikację kolei. W innych krajach Europy spotykamy się obecnie z systemami zasilania napięciem przemiennym. W takich krajach, jak Niemcy i kraje skandynawskie stosuje się system 15 kV 16,7 Hz [13]. Poza tym w różnych częściach Europy rozbudowywany jest system zasilania trakcji napięciem 25 kV, o częstotliwości 50 Hz [17].

Przyczyny różnorodności systemów zasilania trakcji nie mają tylko podłoża technicznego. Początki elektryfikacji kolei w Europie przypadły na okres silnych podziałów politycznych (XIX/XX w.), gospodarczych i militarnych występujących na starym kontynencie. Te podziały uwidoczniły się również w zastosowanych systemach zasilania trakcji kolejowej w poszczególnych krajach.

Każdy z wymienionych systemów ma swoje zalety potwierdzone dziesiątkami lat eksploatacji. Każdy z nich ma również swoje słabe strony. W przypadku napięcia stałego 3000 V, pojawiają się problemy, gdy zwiększa się zapotrzebowanie na pobór mocy. Od dłuższego już czasu zwraca się uwagę, że bardziej korzystne przy dużym zapotrzebowaniu na moc byłoby zasilanie trakcji zdecydowanie wyższym napięciem. Sprawdzonym wariantem są obecnie stosowane systemy napięcia przemiennego.

Trzeba mieć jednak na uwadze, że wprowadzenie napięcia przemiennego do zasilania trakcji kolejowej w Polsce będzie złożonym zagadnieniem, wymagającym znacznego zaangażowania w wielu różnorodnych dziedzinach [12]. Jedną z kwestii, która wystąpi to stworzenia zaplecza badawczego do rozwiązywania problemów związanych z nowym systemem zasilania. Przykładową trudnością jest identyfikacja parametrów schematów zastępczych transformatorów o specyficznych konstrukcjach do zastosowań trakcyjnych.

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące właśnie takiego (wielouzwojeniowego) transformatora.

Jednym z niepożądanych zjawisk występujących w tego typu urządzeniach, dokładniej ujmując w ich elementach przewodzących magnetycznie, jest zjawisko powstawania prądów wirowych [1]. Prądy te wywołują dodatkowe straty mocy $R_{Fe} i_w^2$, czego skutkiem jest między innymi zmniejszenie sprawności maszyny [1].

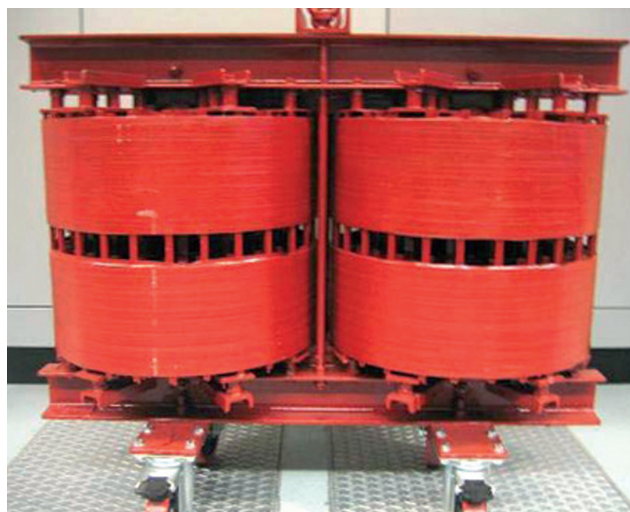
W celu ograniczenia tych strat, obwód magnetyczny nie może stanowić jednolitej masy. Jest on wykonany z tak zwanej blachy transformatorowej, która należy do grupy materiałów magnetycznie miękkich [2].

W artykule zaprezentowano fizyczne skutki wywołane najprawdopodobniej występowaniem prądów wirowych wewnątrz elementów konstrukcyjnych jednofazowego, wielouzwojeniowe-

go, laboratoryjnego transformatora trakcyjnego. Opisano także trudności, wynikające z zastosowania aktualnie istniejących metod identyfikacji elementów schematu zastępczego tego urządzenia.

Opis badanego urządzenia

Badany jednofazowy, wielouzwojeniowy, laboratoryjny transformator trakcyjny przedstawiono na rysunku 1.



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

Jest to laboratoryjny transformator 22-uzwojeniowy, znajdujący się w Hochschule für Technik und Architektur, Freiburg 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 ma cztery różne grupy uzwojeń współśrodkowych [9].

■ Uzwojenia strony pierwotnej

Wysokiego napięcia (HT – *High-voltage windings*) – mają 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 $I_n = 16,875$ A. Na potrzeby dalszej części artykułu uzwojeniom tym przyporządkowano cyfry od 1–4.

■ Uzwojenia strony wtórnej

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

- pomocnicze (*ZSS – Auxiliary windings*), 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 ich prądu $I_n = 20$ A; na po-

trzeby dalszej części artykułu przyporządkowano im liczby od 9–12;

- trakcyjne (*Tr – Traction windings*) – w praktyce zazwyczaj stanowią źródło zasilania przekształtników statycznych w lokomotywie; obydwie grupy uzwojeń zaprojektowano na nominalną wartość napięcia 100 V i moc pozorną 6 kVA; nominalna wartość prądu poszczególnych uzwojeń $I_n = 60$ A, na potrzeby dalszej części artykułu przyporządkowano im liczby od 17–20.

Ponadto uzwojenie filtra (*Filter winding*). Dla sieci odpowiadającej częstotliwości 50 Hz zaprojektowano je na nominalną wartość napięcia 50 V i moc pozorną 250 VA. Nominalna wartość ich prądu $I_n = 10$ A; przypisano im liczby od 21–22.

Opis metody pomiarowej badanego urządzenia

Prezentowany transformator nie jest typowy, albowiem odróżnia go od przedstawicieli jego rodziny wiele niespotykanych powszechnie zjawisk, które przedstawiono w dalszej części pracy. Należy jednak dodać, że w związku z tym, że jest to transformator wielouzwojeniowy, w celu określenia jego parametrów należy dokonać identyfikacji elementów wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora [14, 16]. Przykładowy schemat przedstawiono na rysunku 2.

Identyfikacja elementów gałęzi poprzecznych L_z^z odbywa się za pomocą pomiarów w stanie jałowym transformatora. Natomiast rozpoznania elementów gałęzi podłużnych 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, przedstawiono w [15, 16].

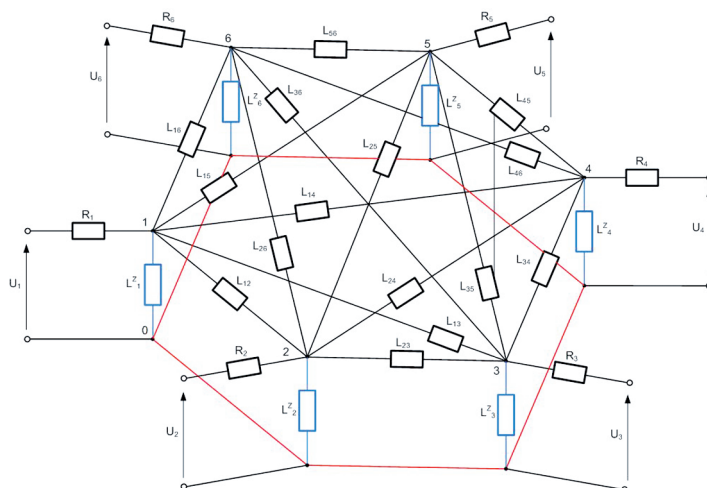
Wyniki pomiarów

A. Pomiary w stanie jałowym

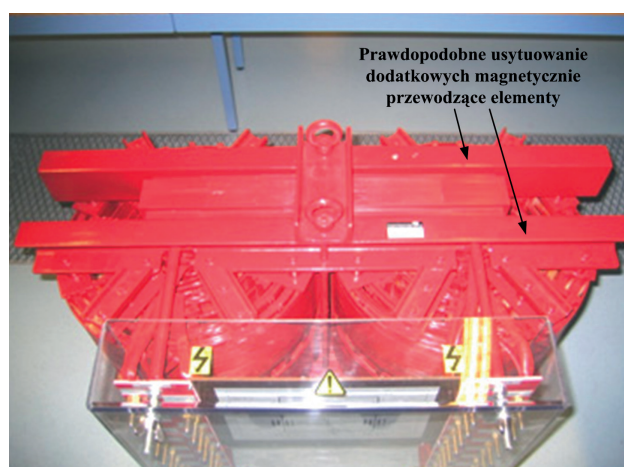
Pomiary dla wartości napięcia znamionowego poszczególnych uzwojeń i częstotliwości 50 Hz wykazały, że zazwyczaj stosowane metody obliczeniowe oparte o wielowrotnikowy schemat zastępczy transformatora nie mogą być wykorzystane [8]. Obliczenia te oparto o założenie wartości kąta przesunięcia fazowego $\varphi \approx 90^\circ$ w zastępczym obwodzie elektrycznym urządzenia dla stanu jałowego.

Podczas pomiarów średnia wartość kąta mocy $\varphi \approx 26,5^\circ$. Sugeruje to, że transformator ten w stanie nieobciążonym ma charakter odbiornika bardziej rezystancyjny niż indukcyjny [10]. 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 urządzenia.

W celu potwierdzenia tej hipotezy dokonano dokładnych oględzin transformatora i na podstawie zaobserwowanych wyników pomiarowych stwierdzono, że obiekt ten może mieć dodatkowe magnetycznie przewodzące elementy, które założono podczas technologicznego procesu montażu. Istnieje również prawdopodobieństwo nieprawidłowego pokrycia impregnatem izolującym blach transformatorowych, a także jego niewystarczających własności dielektrycznych. Położenie elementów konstrukcyjnych, w których przypuszczalnie występuje zjawisko prądów wirowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Wielowrotnikowy schemat zastępczy transformatora sześciouzwojeniowego



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

Wykonano ponadto pomiary, których celem było potwierdzenie występowania dodatkowych, magnetycznie przewodzących elementów badanego urządzenia.

Pomiary te oparto o związek matematyczno-fizyczny (równanie 1) [9].

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

Na podstawie tego równania, 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 [15].

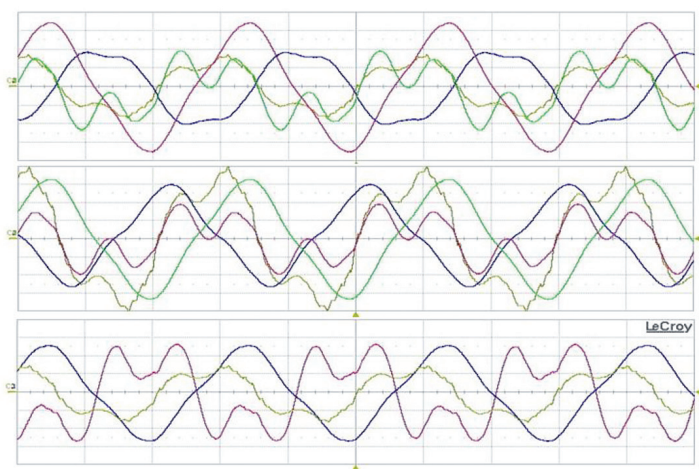
W tabeli 1 przedstawiono przykładowo wybrane wyniki pomiarów związanych z równaniem (1).

Z lewej strony tabeli zaprezentowano 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 wykonano dla stosunku $U_0/f = 4$, natomiast dla

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 [V/Hz]	R_{Fe} [Ω]	U_0 [V]	f [Hz]	U_0/f [V/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	152.580
200.00	50	4	2662.71	49.80	50	1	160.485



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

uzwojenia trakcyjnego stosunek ten wyniósł 1. Z tabeli można zauważyć, 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} zwiększa się 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 niewłaściwego nałożenia blach transformatorowych [8].

Dzięki tym wynikom uzasadnić można zmniejszenie wartości mierzonego kąta mocy. Fenomen ten związany jest najprawdopodobniej z występowaniem zjawiska prądów wirowych wewnątrz elementów konstrukcyjnych urządzenia (rys. 3), czy też zachodzącego tożsamego zjawiska między nieprawidłowo zaizolowanymi blachami transformatorowymi.

B. Pomiary w stanie zwarcia

W związku z tym, że opisywane urządzenie jest transformatorem multisystemowym, zaprojektowanym między innymi do pracy przy zasilaniu obiektu prądem przemiennym o częstotliwości 16,7 Hz lub 50 Hz, pomiary w stanie zwarcia wykonano dla obydwu częstotliwości.

Pomiary dla częstotliwości 16,7 Hz wykonano dwukrotnie za pomocą różnego rodzaju urządzeń (oscylloskopy, elektroniczne urządzenia do pomiaru mocy). Źródłem napięcia zasilania była laboratoryjna maszyna synchroniczna [4]. Podczas pomiarów oscylloskopami charakterystyki czasowe sygnałów napięciowych, jak również prądowych, były znacznie zniekształcone. Najprawdopodobniej jest to wynikiem potwierdzającym istnienie dodatkowych, magnetycznie przewodzących elementów. Przykładowe przebiegi napięcia i prądów w zwartych uzwojeniach transformatora zaprezentowano na rysunku 4 [4].

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

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono obliczenia zgodne z powszechnie dostępną, ogólną teorią transformatorów wielouzwojeniowych [14, 15, 16]. Kalkulacje przeprowadzono 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.

Podsumowanie

Zaprezentowany transformator jest przykładowym urządzeniem, które ze względu na jego wadę konstrukcyjną nie może być opisane za pomocą ogólnej teorii transformatorów wielouzwojeniowych. Jednakże w przypadku odpowiednich modyfikacji wielowrotnikowego schematu zastępczego istnieje możliwość jego zamodelowania, co zaprezentowano między innymi w [5].

Wszystkie zaprezentowane w artykule nietypowe zjawiska dla badanego urządzenia mogą zostać wyjaśnione i zinterpretowane dzięki najprawdopodobniej występowaniu wewnątrz konstrukcji transformatora dodatkowych magnetycznie przewodzących elementów (rys. 3). Przy czym istnieje prawdopodobieństwo, że mała wartość kąta mocy w stanie jałowym wynikać może także ze słabej jakości (pod względem własności dielektrycznych) wykorzystanego impregnatu, czy też niewłaściwego nałożenia blach transformatorowych.

Podziękowanie to jest efektem pochodzącym z wykonanych pomiarów innych transformatorów producenta opisywanego w artykule urządzenia. Transformatory te prezentowały między innymi specyficzne zachowanie typu: zwiększenie kąta mocy wraz ze zwiększeniem wartości skutecznej napięcia transformatora w stanie jałowym. Wynikać to może ze specyficznych właściwości materiału użytego na blachy transformatorowe.

Na uwagę zasługują także rezultaty obliczeń wykonanych na podstawie pomiarów, mających na celu identyfikację elementów gałęzi podłużnej schematu typu wielowrotnikowego, którego przykład przedstawiono na rysunku 2. Wyniki te zaprezentowano w tabeli 2.

Liczby od 1–22 przedstawione w tabeli odpowiadają liczbom, które zostały przypisane uzwojeniom. Natomiast zapis 9–10–11–12 oznacza, że uzwojenia o numerach 9, 10, 11 i 12 zostały połączone szeregowo. Zabieg ten wykonano celowo z uwagi na

Tabela 2

Wyniki obliczeń indukcyjności elementów gałęzi podłużnych schematu wielowrotnikowego badanego transformatora dla częstotliwości 50 Hz

j	L_{ij} [H]	1	2	3	4	9-10-11-12	17	18	19	20	21	22
1	15,145		-0,0149	-0,04822	0,042929	0,00331661	0,007757	0,009822	0,2053	0,064512	0,002654	-0,0854
2	15,145	-0,0154		0,044087	-0,04717	0,00350572	0,008584	0,007377	0,134757	0,180614	0,00175	-0,0961
3	15,141	-0,0437	0,04343		-0,01791	0,00081106	0,205267	0,123788	-0,00716	0,008647	-0,07904	0,001782
4	15,09	0,04426	-0,0454	-0,01862		0,00338081	0,179492	0,217033	0,008996	0,007119	-0,07061	0,00179
9-10-11-12	3,568	0,00283	0,00276	0,002798	0,002855		0,025042	0,020066	0,019834	0,01379	-0,00422	-0,00531
17	4,064	0,0072	0,00841	0,193846	0,193958	0,02390699		-0,00613	0,138829	0,36296	0,000419	-0,25581
18	4,118	0,00978	0,00718	0,135966	0,216736	0,02194057	-0,00622		0,544647	0,185404	0,000449	-0,27495
19	4,179	0,20634	0,14219	-0,00723	0,009361	0,02387003	0,19086	0,476554		-0,00601	-0,21596	0,000354
20	4,14	0,09007	0,1845	0,008972	0,006981	0,01675484	0,250611	0,213274	-0,00589		-0,17221	0,000377
21	1,02	0,00163	0,00163	-0,14276	-0,12719	-0,0077548	0,000404	0,000393	-0,35464	-0,02194		0,000275
22	1,04	-0,1477	-0,1431	0,001573	0,001569	-0,0100533	-0,10087	-0,45231	0,000373	0,000835	0,000278	

to, że rzeczywiste konstrukcje urządzenia, występujące w pojazdach trakcyjnych, zazwyczaj nie mają odczepów i łączy się je szeregowo.

Należy również zaznaczyć, że użyta metoda pomiarowa została przeprowadzona zgodnie z procedurą odpowiadającą poprawnie skonstruowanym transformatorom [7, 12, 13, 14].

Z tabeli 2 można zauważyć, że niektóre z elementów L_{ij} transformatora mają wartości o ujemnych znakach. W dodatku występują różnice między wartościami elementów L_{ij} a L_{ji} . Różnice te w wartości bezwzględnej wynoszą nawet 0,177 H ($\text{abs}[L_{21,19}^Z - L_{19,21}^Z]$). Świadczy to jednoznacznie o niesymetrii zidentyfikowanych elementów transformatora trakcyjnego. W związku z tym aby utworzyć schemat wielowrotnikowy badanego transformatora, istnieje konieczność dokonania symetryzacji elementów zgodnie z istniejącymi metodami matematycznymi. Stanowi to kolejną trudność i jest wynikiem opisywanej wcześniej wady konstrukcyjnej transformatora.

Otrzymane rezultaty obliczeń indukcyjności elementów gałęzi podłużnych schematu wielowrotnikowego badanego transformatora dla częstotliwości 16,7 Hz są analogiczne. Nie mniej jednak wartości wspomnianych różnic, dla sygnałów czasowych stanowiących ich rzeczywiste spektrum, jak również tylko dla ich podstawowej harmonicznej, są znacznie większe i w niektórych przypadkach sięgają one wartości bezwzględnej ($\text{abs}[L_{ij}^Z - L_{ji}^Z]$) ponad 1 H. Jest to efekt wynikający z zaobserwowanego i opisanego w artykule zjawiska, występującego w trakcie pomiarów w stanie zwarcia badanego transformatora.

Na uwagę zasługuje również fakt, że niektóre z niesymetrycznych wartości identyfikowanych elementów dla częstotliwości 16,7 Hz miały wartości o różnych znakach. Stanowi to kolejną trudność w symetryzacji wartości elementów w przypadku przyporządkowania im schematu wielowrotnikowego schematu zastępczego. Należy również dodać, że każda tego typu operacja jest związana z powiększeniem błędu modelu, a co za tym idzie

oddaleniem obiektu rzeczywistego od jego fizycznego i matematycznego odpowiednika. W związku z czym istnieje prawdopodobieństwo, że otrzymane wyniki symulacji, pochodzące z modelu matematycznego opisywanego obiektu, mogą odbiegać od rzeczywistości w istotny sposób. Przedstawione zagadnienie wymaga przeprowadzenia dalszych badań i analiz.



Literatura

- [1] Bajorek Z.: *Teoria maszyn elektrycznych*. PWN, Warszawa 1982.
- [2] Brailford F.: *Materiały magnetyczne*. PWN, Warszawa, 1964.
- [3] Cholewicki T.: *Elektrotechnika teoretyczna*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.
- [4] Dudzik M.: *Modeling a multi-winding transformer at arbitrary winding connections*. Praca magisterska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, 2009.
- [5] Dudzik M.: *Wady konstrukcyjne transformatorów i towarzyszące im zjawiska fizyczne na przykładzie jednofazowego, wielouwojenowego transformatora trakcyjnego*. Materiały konferencyjne SEMTRAK 2010.
- [6] Frontczak F., Kuczborski S., Kuligowski K., Skoniecki J., Wasilewicz W.: *50 lat elektryfikacji PKP*. WKŁ, Warszawa 1989.
- [7] Hayek J.: *Parameters analysis of multi-windings traction transformers*. Praca Doktorska, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Kraków 2002.
- [8] Jezierski E.: Gogolewski Z., Kopczyński Z., Szmit J.: *Transformatory. Budowa i projektowanie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, wyd. 2, Warszawa 1963.
- [9] Jezierski E.: *Transformatory*, t. 1, 2. PWN, Warszawa, 1965.
- [10] Krakowski M.: *Elektrotechnika teoretyczna*, t. 1. PWN, Warszawa 1999.

Dokończenie na s. 59 ➤