

Andrzej Buze

# Transformatory do przetwornic statycznych – projektowanie, realizacje, badania

*Przetwornice statyczne pojazdów trakcyjnych charakteryzuje szeroki zakres parametrów znamionowych oraz różnorodność układów elektrycznych, do których muszą być dostosowane transformatory obniżające napięcie. Wynika z tego różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych transformatorów oraz konieczność ich indywidualnego projektowania. W artykule przedstawiono teoretyczne i praktyczne aspekty konstruowania transformatorów.*

W oparciu o własną metodykę obliczeniową i badania laboratoryjne w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki (ZTE IEI) opracowano (od projektu do wyrobu) ponad 30 typów transformatorów. Zdobyte doświadczenia oraz wyniki prowadzonych badań w Zakładzie były inspiracją do przygotowania niniejszego artykułu.

Wybór rozwiązania zależy przede wszystkim od częstotliwości znamionowej. W związku z tym transformatory dzielą się na dwie kategorie: te o częstotliwości 50 Hz i te o częstotliwości wielokrotnie większej. Pierwszą kategorię można uważać za mniej atrakcyjną, gdyż w zasadzie wywodzi się ona z masowo produkowanych transformatorów, chociaż trafiają się w niej również pomysłowe rozwiązania. Dziedzina transformatorów o wyższych częstotliwościach znamionowych otwiera natomiast pole dla interesujących badań i rozwiązań technicznych, dlatego stała się specjalnością Zakładu. W ZTE IEI są wykonywane transformatory o częstotliwości od kilkuset Hz do kilkunastu kHz.

Stosując podwyższone częstotliwości, obniża się wymiary i masę transformatora, a także dławików indukcyjnych przetwornicy, uzyskuje się przy tym wysoką sprawność transformatora. W oparciu o prawa wzrostu maszyn elektrycznych podjęto próbę ilościowego określenia powyższych zysków. Z podanego zestawienia parametrów wykonanych transformatorów wynika stopień, w jakim miniaturyzacja transformatora zależy od materiału magnetycznego rdzenia.

## Wymiary, masa, sprawność

Powyższe parametry stanowią uwikłane funkcje częstotliwości, zależą bowiem również od rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego, proporcji wymiarów, ilorazu masy uzwojenia do masy rdzenia, właściwości użytych materiałów. Zależności wymiarów masy i sprawności od częstotliwości transformatora zostały zatem określone w sposób ogólny, wychodząc z mocy elektromagnetycznej:

$$P = E \cdot I = w \cdot S_r \cdot B \cdot f \cdot \sigma \cdot q_u \quad (1)$$

Wydzielone w nim straty mocy wynoszą:

$$\Delta P = \frac{\sigma^2}{\gamma} \cdot V_u + \Delta p \cdot M_r \quad (2)$$

Gęstość prądu w uzwojeniu  $\sigma$  oraz straty jednostkowe w rdzeniu  $\Delta p$  charakteryzują obciążenie materiałów czynnych. Na wstępie przyjęto, że jest ono niezmiennie w przypadku różnych wartości częstotliwości znamionowych, czyli:

$$\sigma = \text{const.} \quad (3a)$$

$$\Delta p = \text{const.} \quad (3b)$$

Stratność rdzenia można wyrazić wzorem:

$$\Delta p = a \cdot B^k \cdot f^n \quad (4)$$

Spełniając warunek (3b), mamy zatem proporcjonalność:

$$B \cdot \alpha \cdot f^{-n/k}$$

po wprowadzeniu do (1):

$$P \cdot \alpha \cdot w \cdot q_u \cdot S_r \cdot \sigma \cdot f^{1-\frac{n}{k}}$$

ponieważ:  $S_r \propto l^2$ , jak również: w  $q_u \propto l^2$ , więc:

$$P \cdot \alpha \cdot f^{\frac{k-n}{k}} \cdot l^4$$

Stąd przy danej mocy  $P$  występują proporcje:

$$l \cdot \alpha \cdot P^{1/4} \cdot f^{\frac{n-k}{4k}} \quad (5)$$

$$M \cdot \alpha \cdot l^3 \cdot \alpha \cdot P^{3/4} \cdot f^{\frac{3(n-k)}{4k}} \quad (6)$$

$$\Delta P \cdot \alpha \cdot l^3 \cdot \alpha \cdot P^{3/4} \cdot f^{\frac{3(n-k)}{4k}} \quad (7)$$

$$\eta \cdot \alpha \cdot l - \frac{\Delta P}{P} \cdot \alpha \cdot l - P^{-1/4} \cdot f^{\frac{3(n-k)}{4k}} \quad (8)$$

Zależności (5)–(8) zostały wyprowadzone, gdy przyjęto jako stałe obciążenie materiałów czynnych. Większe znaczenie praktyczne może mieć natomiast założenie, że obciążenie materiałów ulega zmianom, natomiast stały jest przyrost temperatury  $\Delta \vartheta$  przy jednakowych warunkach chłodzenia powierzchniowego ( $\alpha_p = \text{const.}$ ), występujących przykładowo w przypadku chłodzenia naturalnego. Stosownie do (2) i (4):

$$\Delta \vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha_p \cdot S_p} = \frac{C_1 \cdot \sigma^2 \cdot V_p + C_2 \cdot B^k \cdot V_r}{\alpha_p \cdot S_p} \cdot \alpha \cdot \frac{(C_1 \cdot \sigma^2 + C_2 \cdot B^k) \cdot l^3}{l^2} = (C_1 \cdot \sigma^2 + C_2 \cdot B^k) \cdot l$$

Jeśli zmniejsza się wymiar liniowy, zachodzi poprawa warunków odprowadzenia strat. Oznacza to, że miniaturyzując transformator, można dodatkowo zwiększyć obciążenia materiałów, np. wg proporcji:

$$\sigma \cdot \alpha \cdot l^{-1/2} \quad B \cdot \alpha \cdot l^{-1/k}$$

$$\sigma \cdot B \cdot \alpha \cdot l^{-1/2-1/k} = l^{-(2+k)/2k} \quad (9)$$

Efektem tego będzie wzrost mocy transformatora lub zmniejszenie jego wymiarów gabarytowych.

Ilustrując powyższe zależności przykładem, przyjęto rdzeń amorficzny z materiału METGLAS, którego stratność została określona wzorem:

$$\Delta p = 6,5 \cdot B^{1,74} \cdot f^{1,51}$$

Wykaz oznaczeń użytych we wzorach:

- a,  $C_1$ ,  $C_2$  – Współczynniki,
- B – amplituda indukcji magnetycznej,
- E – siła elektromotoryczna,
- f – częstotliwość znamionowa,
- I – prąd znamionowy,
- k, n – wykładniki potęg,
- l – wymiar liniowy transformatora,
- $M_r$ ,  $M_u$  – masa rdzenia, masa uzwojenia,
- M – masa materiałów czynnych,
- P – moc znamionowa,
- $\Delta P$  – straty sumaryczne,
- $\Delta p$  – straty jednostkowe (stratność) materiału magnetycznego,
- $q_u$  – powierzchnia przekroju przewodu uzwojenia,
- $S_p$  – powierzchnia chłodzenia transformatora,
- $S_r$  – powierzchnia przekroju czynnego rdzenia,
- w – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
- $V_p$ ,  $V_r$  – objętość czynna uzwojenia, rdzenia,
- $\sigma$  – gęstość prądu w uzwojeniu pierwotnym,
- $\alpha_p$  – współczynnik chłodzenia powierzchniowego,
- $\gamma$  – przewodność właściwa przewodu uzwojenia,
- $\eta$  – sprawność,
- $\Delta \theta$  – przyrost temperatury uzwojenia.

Dla porównania: w tabeli 1 są podane wymiar liniowy l, masa M, straty  $\Delta P$  i sprawność  $\eta$  transformatora, wyrażone w jednostkach względnych w przypadku częstotliwości znamionowej 1 kHz i 10 kHz. Obliczenia wykonano na podstawie wzorów (5)–(8).

Wyniki oznaczone symbolem „\*”) otrzymano przy założeniu tego samego przyrostu temperatury w przypadku częstotliwości 1 kHz i 10 kHz z uwzględnieniem poprawki stosownej do (9).

Zaskakuje względnie małe zmniejszenie wymiarów i masy przy 10-krotnym zwiększeniu częstotliwości znamionowej. Znaczące efekty można natomiast uzyskać, stosując rdzeń wykonany z nowoczesnego materiału o małej stratności i odpowiednio wysokiej indukcji nasycenia. Są to taśmy amorficzne, a najlepiej – nanokrystaliczne. Dzięki temu transformatory o częstotliwości rzędu kilku, a zwłaszcza kilkunastu kHz, są wielokrotnie mniejsze niż w przypadku częstotliwości przemysłowej.

Zależność (8) świadczy o wzroście sprawności transformatorów wraz ze zwiększeniem ich częstotliwości znamionowej oraz mocy. Po opracowaniu materiałów amorficznych, a zwłaszcza nanokrystalicznych, nastąpił skokowy postęp w zakresie miniaturyzacji i sprawności. Niskie straty mają szczególne znaczenie, jeśli transformator jest umieszczony razem z elementami elektronicznymi w jednej obudowie.

Drugim, oprócz rdzenia, czynnikiem o podstawowym znaczeniu jakościowym są uzwojenia.

## Wybór rozwiązania konstrukcyjnego

Wybór rozwiązania zależy głównie od parametrów znamionowych transformatora, wymagań i priorytetów stawianych przez konstruktorów przetwornic. Najczęściej transformatory są projektowane według indywidualnych założeń. Optymalizacji podlegają zwykle: wymiary, masa, koszt, sprawność energetyczna, przyrost temperatury z uwzględnieniem właściwej współpracy z przekształtnikiem przy napięciu o charakterze impulsowym.

Kluczowe znaczenie ma wybór materiału rdzenia. Faktem jest rozwój jakości blachy krzemowej. Zmniejszona została grubość standardowo produkowanej blachy transformatorowej do 0,23 mm, przy wysokim współczynniku wypełnienia rdzenia. Dostępna jest blacha o grubości 0,15 i 0,1 mm. Produkowane są

**Tab. 1.** Wyniki obliczeń l, M,  $\Delta P$ ,  $\eta$

Częstotliwość znamionowa [kHz]	l	M	$\Delta P$	$\eta$	Uwagi
1	1	1	1	1-CP <sup>0,251</sup>	
10	0,92673 0,90798*)	0,7959 0,74857*)	0,7959	1-0,7959 P <sup>-0,25</sup>	$\sigma = \text{const.}$ $\Delta P = \text{const.}$ $\Delta \theta = \text{const.}$

Źródło: oprac. własne.

**Tab. 2.** Stratność materiałów magnetycznych miękkich

Rodzaj materiału	Indukcja nasycenia [T]	Stratność przy indukcji 0,2 T i częstotliwości 25 kHz [W/kg]
ferryty miękkie	~0,5	17
amorficzny	1,56	10
nanokrystaliczny	1,23	4

Źródło: oprac. własne.

blachy Hi-fi o podwyższonej indukcji nasycenia, a także blachy z wysoką zawartością krzemu (6%). Dzięki temu, w oparciu o nisko stratne blachy krzemowe, produkowane są w ZTE IEL transformatory o częstotliwości nawet do 1000 Hz. W przypadku częstotliwości od ok. 1 kHz do kilku kHz zalecany jest materiał amorficzny, zaś powyżej 5 kHz przewagę zyskuje materiał nanokrystaliczny. O wyborze decydują wymiary, masa, koszty, a także konstrukcja rdzenia. Do produkcji transformatorów o wysokich częstotliwościach znamionowych są tradycyjnie stosowane ferryty. Ich zaletą są względnie niskie ceny, wadą – kształty i ograniczenia gabarytowe, narzucone wymiarami stosowanych form do prasowania proszków.

Powyższe materiały charakteryzują dane zawarte w tabeli 2, przytoczone wg [9].

W praktyce największe znaczenie ma stratność materiału, gdyż omawiany rodzaj transformatorów pracuje zazwyczaj znacznie poniżej indukcji nasycenia. Zwykle stosowane są rdzenie zwijane – toroidalne lub prostokątne. Te drugie bywają wykonywane z pasków taśmy, które są zaplatane na części rdzenia poza uzwojeniem.

Przy podawanych przez producentów właściwościach materiałów magnetycznych brakuje deklaracji odnośnie do kształtu napięcia, przy którym robiono pomiary. Przyjmuje się domyślnie, że jest on sinusoidalny. Najczęściej omawiane transformatory są jednak zasilane napięciem prostokątnym. Stratność rdzenia jest mniejsza niż wówczas, gdy napięcie ma przebieg sinusoidalny (przy tej samej jego amplitudzie) [4]. Odształcenie od sinusoidalnego przebiegu prądu obciążenia może natomiast być przyczyną dużych strat w uzwojeniu. Jeśli obciążenie transformatora ma charakter czynny, przebieg prądu jest zbliżony do prostokątnego. Jeżeli uzwojenie jest niestosownie zaprojektowane, występujące stromości prądu  $di/dt$  mogą powodować nawet większe od znamionowych straty dodatkowe. Z tego powodu uzwojenia omawianych transformatorów są często nawijane licą lub równoległymi drutami o małej średnicy. Wybór rodzaju przewodu i średnicy drutów zależy od wyników obliczeń i decyzji projektującego. Ostateczna forma transformatora jest raczej zbliżona do rozwiązań konwencjonalnych. W przypadku transformatorów toroidalnych często stosuje się zalewanie masą izolacyjną.

## Projektowanie i realizacje

W trakcie projektowania wykonywane są obliczenia wielu wariantów transformatora wg procedur opracowanych w ZTE IEL. Poszczególne warianty różnią się rodzajem materiału rdzenia, proporcjami wymiarów, ilorazem masy uzwojenia do masy rdzenia,

stopniem wykorzystania materiałów czynnych, przyrostem temperatury uzwojenia. Zazwyczaj obliczane są 2 wersje konstrukcyjne: z rdzeniem toroidalnym lub prostokątnym. W przypadku tej pierwszej uzwojenie pokrywa cały obwód toroidu. Lepsze warunki odprowadzania strat do czynnika chłodzącego ma wówczas uzwojenie, gorsze – rdzeń. W przypadku transformatora z rdzeniem prostokątnym może być odwrotnie: jeśli część obwodu rdzenia ma lepsze warunki chłodzenia, uzwojenie jako bardziej skupione jest chłodzone gorzej. Transformatory toroidalne charakteryzuje niskie napięcie zwarcia i cicha praca. Wymagają one natomiast specjalnej nawijarki, ale dysponując tym urządzeniem, zyskuje się istotne uproszczenie procesu produkcyjnego.

Transformatory są wytwarzane przez ZTE IEL częściowo we własnym zakresie, częściowo – we współpracy z zakładami produkującymi uzwojenia i transformatory. W tabeli 3 zestawione zostały przykładowe dane transformatorów opracowanych w ZTE IEL. W przypadku oznaczeń „ $\phi$ ”, występujących w rubryce „wymiały”, są to transformatory toroidalne. Napięcie uzwojenia pierwotnego jest wpisane w oznaczenie typu (na ostatniej pozycji obok mocy).

Do oceny stopnia miniaturyzacji wyrobu przyjęto współczynnik wykorzystania masy w postaci ilorazu mocy w potęgze 0,75 do masy materiałów czynnych  $M_u + M_r$ . Im ten współczynnik jest większy, tym wynik jest korzystniejszy. W ostatniej rubryce podano symbol materiału rdzenia. Litera „A” oznacza materiał amorficzny, „N” – nanokrystaliczny, „K” – blachę krzemową.

Zwraca uwagę wielokrotnie większy współczynnik wykorzystania masy w przypadku rdzeni nanokrystalicznych w porównaniu z pozostałymi dwoma rodzajami materiału oraz względnie niewielki efekt miniaturyzacji w przypadku rdzeni amorficznych.

## Badania

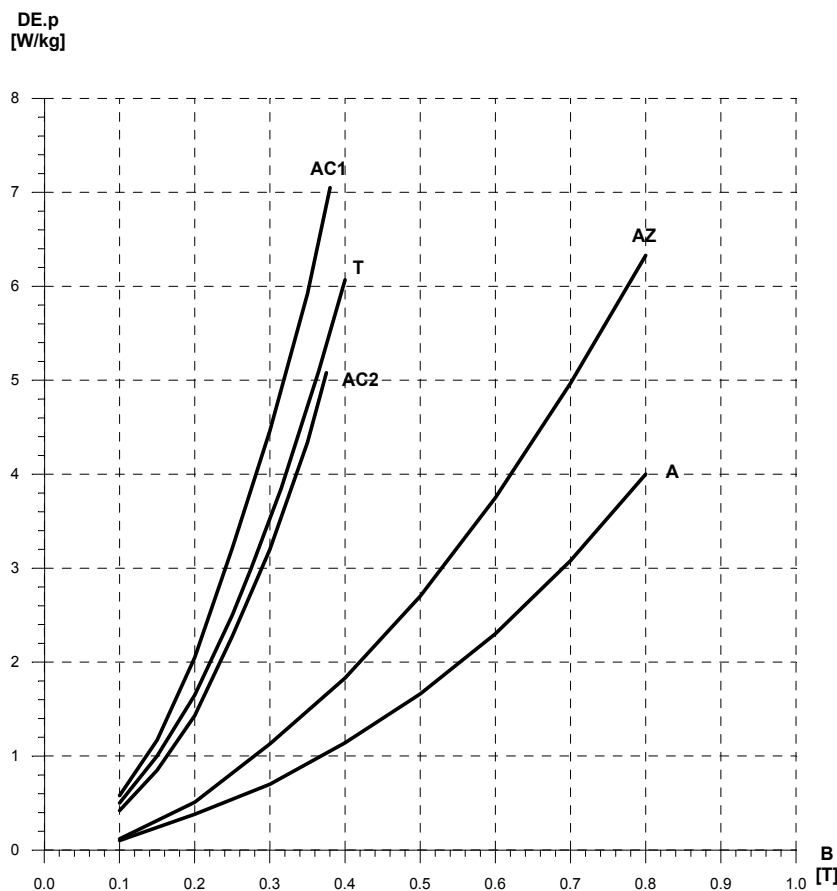
Można wymienić 3 kategorie badań prowadzonych w laboratorium ZTE IEL:

- ❖ materiałowe,
- ❖ odbiorcze,
- ❖ konstruktorskie.

Badaniom materiałowym poddawane są gotowe rdzenie magnetyczne [1, 3]. Zwykle w trakcie wytwarzania rdzenia jego materiał ulega degradacji, zatem właściwości magnetyczne rdzenia są gorsze od właściwości materiału zadeklarowanych przez jego producenta. Badania prowadzone są przy tym w warunkach zasilania możliwie zbliżonych do tych, które występują w eksploatacji. W wyniku badań są uzyskiwane charakterystyki magnesowania, stratności i przenikalności magnetycznej w funkcji indukcji  $B$ . W przypadku transformatorów o częstotliwości znamionowej wielokrotnie większej od 50 Hz o wymiarach rdzenia decyduje jego stratność, zatem charakterystyka  $\Delta p = f(B)$  ma praktycznie największe znaczenie przy projektowaniu.

Na rys. 1 są przedstawione przykładowe charakterystyki stratności 5 rodzajów rdzeni przy częstotliwości 1 kHz.

Porównując zależności na rys. 1, można ocenić stopień degradacji stratności w trakcie wykonania badanych rdzeni amorficznych



Oznaczenia: AC1, AC2 – rdzenie amorficzne cięte, AZ – rdzeń amorficzny zaplatany, A – taśma amorficzna (charakterystyka deklarowana), T – rdzeń cięty z blachy transformatorowej.

Rys. 1. Stratność rdzeni przy  $f = 1\,000\text{ Hz}$  i napięciu prostokątnym  
Źródło: oprac. własne.

Tab. 3. Dane przykładowych transformatorów opracowanych w Instytucie

Typ	P	f	$U_2$	$\eta$	$\Delta U$	$I_0$	Wymiały	$M_u + M_r$	$\frac{(P)^{0,75}}{M_u + M_r}$
	kW	kHz	V	%	%	%	mm	kg	(kW) <sup>0,75</sup> /kg
T-6,5/600	6,5	8	550	99,6	2,1	0,6	$\phi$ 130×60	1,2	3,392N
T-9/300	9	10	520; 30	99,5	3	0,7	$\phi$ 184×85	1,35	3,849N
T-19/480	19	15	19	99,7	1,9	6,8	$\phi$ 150×80	2,95	3,085N
T-22,5/550	22,5	12	450	99,7	2,3	5,4	$\phi$ 152×92	3	3,444N
T-35/1500	35	1	560	98,2	2,13	6	600×300×185	48,5	0,297K
T-35/660	35	10	560	99,8	2,2	0,9	$\phi$ 160×100	3,8	3,787N
T-75/1000	75	1	710;170;400	99,5	1,5	0,12	$\phi$ 420×210	52	0,4901A
T-100/550	100	4	2450	99,4	7,7	0,11	580×270×140	64	0,4941A
T-150/1000	150	1	730;140;400	99,7	7	0,31	590×312×170	100	0,4286A

Źródło: oprac. własne.

nych zaplatanych. Charakterystyki **AC1**, **AC2**, **T** świadczą o tym, że jakość źle wykonanych rdzeni amorficznych została sprawdzona do poziomu rdzeni z blachy krzemowej zimnowalcowanej.

Badania odbiorcze transformatorów stanowią próby wyrobu oraz typu wg normy PN-EN 60310. Każdy transformator jest dodatkowo poddawany próbie izolacji międzyzwojowej.

Badania konstruktorskie służą bardziej wnikliwej ocenie jakości. Ich prowadzenie jest warunkiem koniecznym do realizacji nowych rozwiązań. Spośród wykonywanych badań tego typu można przykładowo wymienić:

- ♦ próby nagrzewania z wentylacją wymuszoną o różnej intensywności,
- ♦ próby cieplne w celu doboru optymalnego rodzaju masy izolacyjnej,
- ♦ pomiary współczynnika strat dodatkowych w uzwojeniach,
- ♦ wyznaczanie charakterystyki rezystancji oraz indukcyjności zwarcia w funkcji częstotliwości.

## Podsumowanie

Na podstawie rozważań zawartych w niniejszym artykule, popartych wynikami badań empirycznych, można sformułować następujące wnioski i uogólnienia:

1. Transformatory przetwornic statycznych są najczęściej projektowane indywidualnie, aby spełnić różnorodne wymagania konstruktorów przetwornic. Opracowywanie i wytwarzanie tego rodzaju transformatorów należy do specjalności ZTE IEI, w którym zaprojektowano i wykonano ponad 30 typów transformatorów.
2. W celu miniaturyzacji transformatorów i dławików przetwornic stosowane są zwykle częstotliwości znamionowe wielokrotnie większe od 50 Hz. Na podstawie prawa wzrostu maszyn elektrycznych zostały wyprowadzone w rozdziale 2 ogólne zależności wymiaru liniowego, masy, strat i sprawności od częstotliwości oraz podany został przykład liczbowy. Zwiększając 10-krotnie częstotliwość znamionową, można uzyskać zmniejszenie wymiaru liniowego tylko o ok. 9%, a masy o ok. 25%. Wyniki te mogą zaskakiwać, gdyż – zgodnie z (1) – moc jest proporcjonalna do częstotliwości.
3. Efekt minimalizacji transformatora poprzez zwiększanie częstotliwości znamionowej jest stymulowany przez różnicę wykładników potęg  $k-n$  we wzorze (4), określającym stratność rdzenia.
4. W tabeli 3 zestawione są dane 9 transformatorów opracowanych w ZTE IEI. Ostatnia rubryka zawiera wartości proponowanego przez autora współczynnika wykorzystania masy. Współczynnik ten jest wielokrotnie większy w przypadku rdzeni nanokrystalicznych niż w przypadku rdzeni wykonanych z pozostałych rodzajów materiału. Zastąpienie rdzeni krzemowych amorficznymi jest natomiast dużo mniej efektywne; mają one ponadto kilkakrotnie wyższą cenę,
5. Oprócz materiału magnetycznego o jakości wyrobu decyduje konstrukcja i technologia wykonania rdzenia oraz montaż transformatora. Stąd wynika potrzeba monitorowania właściwości rdzenia w toku produkcji (przynajmniej podczas wytwarzania prototypów).
6. Projektując transformatory przekształtników, trzeba brać pod uwagę odkształcone przebiegi prądu i napięcia. W przypadku prostokątnego przebiegu napięcia stratność rdzenia jest mniejsza niż w przypadku przebiegu sinusoidalnego, lecz duże stromości prądu mogą powodować straty dodatkowe, prowadzące do przegrzania uzwojeń. Zalecane jest wówczas nawijanie uzwojeń licą lub drutami o małej średnicy.
7. Panuje przekonanie, że transformatory stanowią przestarzały, jakby zamknięty rozdział techniki. Nie jest to słuszne, szczególnie w przypadku urządzeń specjalnych, do których zaliczają się transformatory przetwornic statycznych. W związku z rozwojem szybkich łączników krzemowych, a zwłaszcza aparatów półprzewodnikowych opartych na węglu krzemu, otwiera się nowa przestrzeń dla opracowań w dziedzinie transformatorów wysokiej częstotliwości.

## Bibliografia:

1. Buze A., *Badania właściwości magnetycznych rdzeni transformatorów i dławików do przekształtników*, „Prace Instytutu Elektrotechniki” 2012, nr 259.
2. Buze A., Krawczyk A., *Properties of coiled core of cold rolled sheets with frequency up to 2000 Hz*, Materiały Konferencji ISEF'95, Thesaloniki 1995.
3. Buze A., Zieliński A., *Badania właściwości magnetycznych rdzeni zwiżanych do zastosowań specjalnych*, Materiały VI Konferencji Naukowej „Postępy w Elektrotechnologii”, 2006.
4. Buze A., Zieliński A., *Właściwości magnetyczne rdzeni zwiżanych przy sinusoidalnym i prostokątnym przebiegu napięcia wzbudzenia*, VIII Sympozjum pomiarów magnetycznych, 2006 [materiały konferencyjne].
5. Jezierski E., Hasterman Z., *Transformatory*, WNT, Warszawa 1983.
6. Jezierski E., *Transformatory. Podstawy teoretyczne*, WNT, Warszawa 1965.
7. Lejtes L. W., *Elektromagnitnye rasčety transformatorow i reaktorow*, Energija, Moskwa 1981.
8. Petrov G. N., *Električeskie mašiny, cz. I.*, Gosudarstvennoe Energetičeskoe Izdatelstwo, Moskwa 1956.
9. Soiński M., *Materiały magnetyczne w technice*, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2000.
10. Soiński M., *Materiały magnetyczne w technice*, Materiały IV Konferencji Naukowej „Postępy w Elektrotechnologii”, 2000.
11. „Technical Bulletin – METGLAS”.

Artykuł został przygotowany na XVI Ogólnopolską Konferencję Naukową Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2014, zorganizowaną przez Politechnikę Krakowską w październiku 2014 r.

## SEMTRAK 2014

### Autor:

dr inż. **Andrzej Buze** – Instytut Elektrotechniki, Warszawa

### Transformers for static power converters. Design, constructions, research

*Electrotechnical Institute has been conducting research and design of transformers with nominal frequency greatly exceeding 50 Hz. Over 30 types of transformers were designed and built by the institute. This paper was elaborated basing on acquired experience in and the research results.*

*Basing on the laws of electric machines growth, dependencies of size, mass, losses and efficiency on nominal frequency were derived. It was shown that raising the nominal frequency by multiple factor does not give much benefit. It was shown that, for the transformer mass decrease, the key factor is dissipation of magnetic materials, construction and technology of production of the core.*

*Table 3 contains parameters of nine types of transformers designed and built in the institute. High efficiency was obtained, and in case of nanocrystalline cores, exceptionally small mass of the transformers.*

*This paper contains practical advices and remarks regarding construction and method of production of the transformers. Brief description of the research conducted in the Electrotechnical Institute was presented. Sample results of the dissipation of several types of cores were presented.*