

Janusz Rak, Marek Gała, Kazimierz Jagiela, Marian Kępiński  
Politechnika Częstochowska, Częstochowa

## ANALIZA OBCIĄŻENIA I STRAT W TRANSFORMATORACH PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

### ANALYSIS OF LOAD AND LOSSES IN CONVERTER TRANSFORMERS OF ELECTRIC DRIVES

**Abstract:** Electric converter drives are nonlinear loads that produce higher harmonics of current. To reduce their influence on quality of electric energy in a power network, medium and high power drives are fed from separate converter transformers. The secondary current of these transformers are non-sinusoidal due to properties of converters and, sometimes, the supply voltage is also distorted. A non-sinusoidal current and voltage with significant content of higher harmonics result in additional power losses and heating of a transformer. As a result, due to thermal effects, the transformed power has to be reduced in comparison to nominal power specified for a linear load. The article deals with analysis of load and losses of transformers feeding frequency converters and controlled rectifiers of steelworks drives. Necessary reductions of transformers nominal power due to non-sinusoidal load current are determined on the basis of harmonic spectra of recorded waveforms of voltages and currents.

#### 1. Znaczenie transformatorów w układach przekształtnikowych

Obecnie u wielu użytkowników energii elektrycznej znaczna część, a niekiedy nawet większość odbiorników charakteryzuje się nieliniowością charakterystyk napięciowo-prądowych, przy czym problem ten dotyczy zarówno odbiorców przemysłowych jak i komunalnych. Wynika to z wielu przesłanek: rozwoju energoelektroniki, wprowadzania nowoczesnych technologii informatycznych i telekomunikacyjnych, stosowania energooszczędnych źródeł światła, itp. Szybki wzrost zarówno ilości jak i mocy odbiorników elektronicznych i urządzeń energoelektronicznych spowodował problemy związane z obecnością i zwiększającym się poziomem wyższych harmonicznym w sieci.

W obwodach głównych urządzeń energoelektronicznych tradycyjnie wyróżnia się dwa rodzaje transformatorów przeznaczonych do współpracy z przekształtnikami [15]:

- 1) transformatory przekształtników sieciowych pracujące przy napięciu sinusoidalnym o stałej częstotliwości 50/60 Hz,
- 2) transformatory wyjściowe przemienników częstotliwości pracujące przy napięciu odkształconym zazwyczaj o regulowanej częstotliwości w zakresie do kilkuset Hz w technice napędowej lub rzędu kilkudziesięciu kHz w grzejnictwie indukcyjnym.

Do niedawna transformatory przekształtnikowe występowały głównie w technice napędowej.

Instalowano je w przemysłowych układach napędowych od strony sieci zasilającej zazwyczaj w przypadku indywidualnych napędów dużej mocy lub do zasilania jednorodnej grupy przekształtników – prostowników lub przemienników częstotliwości. W wyniku wprowadzenia w elektroenergetyce systemów HVDC pojawił się nowy rodzaj transformatorów przekształtnikowych dużej mocy przeznaczony dla linii prądu stałego. W systemach przesyłowych HVDC transformatory nie tylko modyfikują napięcie, aby umożliwić wymianę mocy między obwodami AC i DC, ale również przekształcają napięcie przemiennie z układu trójfazowego na sześciofazowy. Pozwala to na istotne zredukowanie spektrum harmonicznym w prądach generowanych przez zawory przekształtnika, a co za tym idzie ograniczenie strat dodatkowych w transformatorze. Ponadto transformator stanowi barierę dla napięcia stałego, zapobiegając jego przedostaniu się do systemu AC. Transformatory przekształtnikowe do systemów HVDC budowane są najczęściej jako jednofazowe trójzwojieniowe z dwoma uzwojeniami zaworowymi, jednym dla połączenia w trójkąt oraz drugim dla połączenia w gwiazdę.

Transformatory przekształtnikowe instalowane w układach napędowych od strony sieci zasilającej spełniają następujące podstawowe zadania:

- dostosowują wartości napięcia sieci zasilającej do wymagań układu przekształtnika, a pośrednio do napięcia znamionowego silnika napędowego,
- w przypadku prostowników wielopulsowych dostarczają napięcie o przesunięciu fazowym wynikającym z konfiguracji prostownika,
- zmniejszają oddziaływanie wynikające z charakteru pracy przekształtnika na sieć zasilającą, a tym samym na warunki pracy innych odbiorców w sieci,
- ograniczają oddziaływanie zaburzeń powstających w systemie zasilającym na pracę przekształtnika,
- ograniczają wartości prądów zwarciovych w przekształtniku oraz stromość narastania prądu zaworów w stanach komutacyjnych.

W przypadku transformatorów przekształtnikowych istotne znaczenie ma wielkość napięcia zwarcia, które wynosi od 6% przy średnich mocach do 10% dla napędów dużej mocy – rzędu MW. Podwyższona, w odniesieniu do transformatorów rozdzielczych, wielkość indukcyjności rozproszenia, a tym samym reaktancji ogranicza wartość ustaloną prądu zwarcia i szybkość jego narastania, co umożliwia właściwą koordynację zabezpieczeń nadprądowych i skuteczną ochronę zaworów przekształtnika.

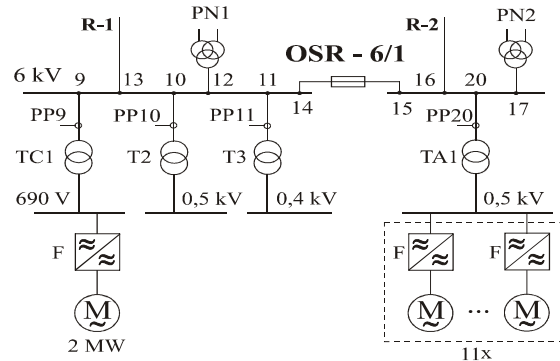
Podwyższenie napięcia zwarcia transformatora powoduje jednakże negatywne skutki – zwiększenie kąta komutacji w prostownikach, a zatem wzrost poboru mocy biernej, jednakże następuje zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w prądzie pobieranym z sieci [15].

## 2. Warunki pracy transformatorów w napędach z przekształtnikami

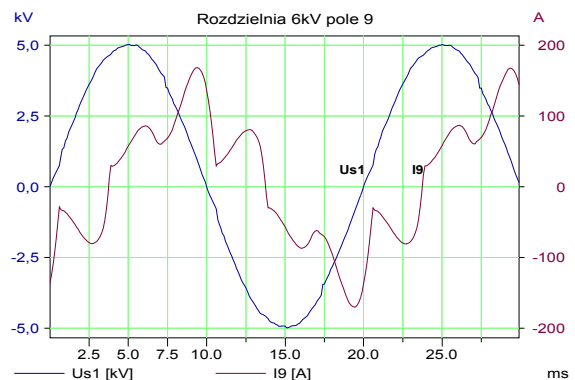
Podczas pracy transformatorów sieciowych współpracujących z układami energoelektronicznymi w uzwojeniach występują odkształcone przebiegi prądów zależne od rodzaju przekształtnika i jego konfiguracji. Ponadto wartość skuteczna prądu w uzwojeniu pierwotnym może się znacznie różnić od podzielonej przez przekładnię wartości skutecznej prądu uzwojenia wtórnego [15].

W ostatnich latach większość nowych aplikacji realizowana jest na bazie przemienników częstotliwości. Taki trend wynika z poszukiwania oszczędności energii elektrycznej oraz szybkiego rozwoju nowych technologii wymagających precyzyjnego sterowania napędami [7]. Przemienniki częstotliwości umożliwiają płynną regulację prędkości obrotowej silników

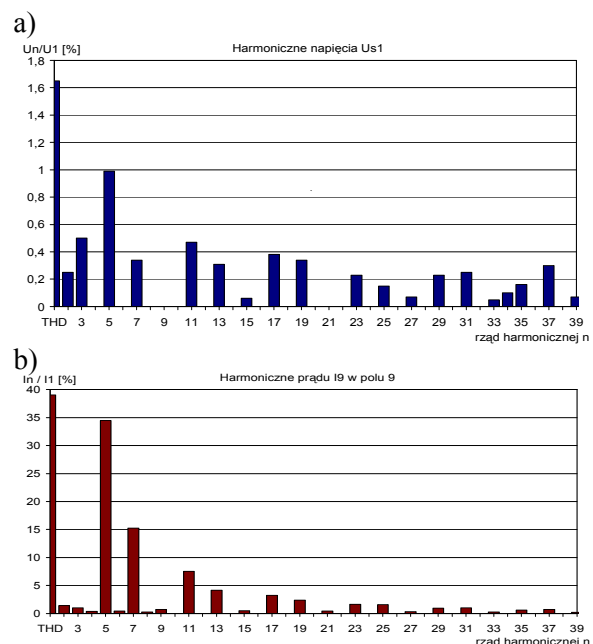
prądu przemiennego, przez równoczesną zmianę wartości napięcia i częstotliwości. Wykorzystywane są do sterowania układami pomp, wentylatorów, napędów dźwignic, transporterów, itp.



Rys. 1. Schemat zasilania napędów AC [8]

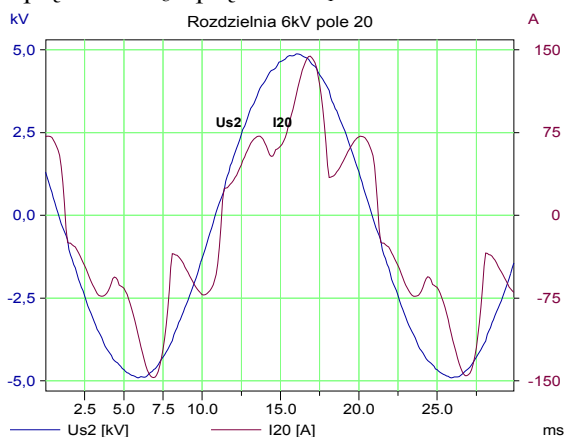


Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu transformatora TC1 po stronie 6 kV [8]

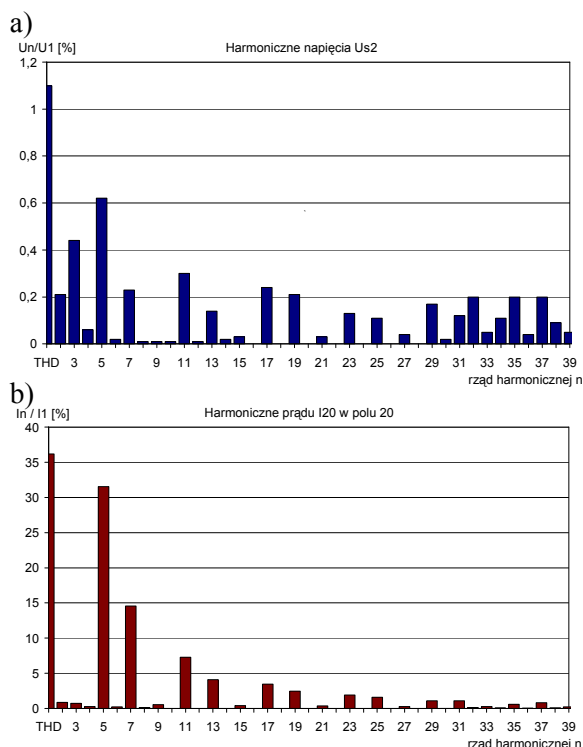


Rys. 3. Harmoniczne napięcia i prądu transformatora TC1 po stronie 6 kV

Na rysunkach 2 i 3 pokazano przebiegi wartości chwilowych napięcia i prądu po stronie 6 kV transformatora żywicznego TC1 (rys. 1) o mocy 2,5 MVA zasilającego przemiennik częstotliwości z silnikiem asynchronicznym o mocy 2 MW oraz rozkłady harmonicznych tych przebiegów wraz ze współczynnikami zniekształceń napięcia  $THD_U$  i prądu  $THD_I$ .



Rys. 4. Przebiegi napięcia i prądu transformatora TA1 po stronie 6 kV [8]

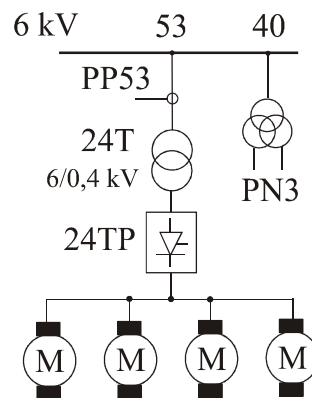


Rys. 5. Harmoniczne napięcia i prądu transformatora TA1 po stronie 6 kV

Kolejne rysunki 4 i 5 przedstawiają przebiegi napięcia i prądu po stronie 6 kV transformatora żywicznego TA1 (rys. 1) o mocy 1,6 MVA zasilającego zespół jedenastu przemienników częstotliwości z silnikami klatkowymi oraz roz-

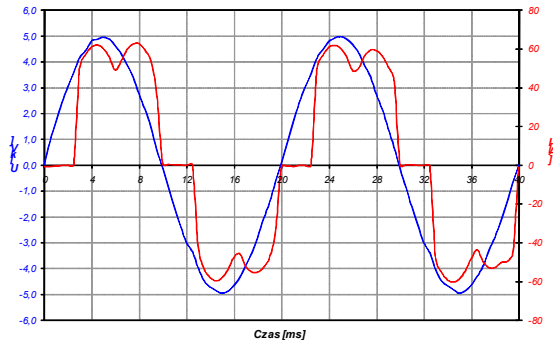
kłady harmonicznych tych przebiegów wraz ze współczynnikami zniekształcenia  $THD$ .

Podstawową przyczyną odkształcenia krzywej napięcia w sieci przemysłowej średniego napięcia, której fragment zamieszczono na rys. 1, jest pobór niesinusoidalnych prądów przez odbiorniki nieliniowe, jakimi są przemienniki częstotliwości zastosowane w układach napędowych. Powoduje to występowanie na impedancji sieci zasilającej spadków napięć o kształcie zbliżonym do pobieranego prądu, czego konsekwencją jest pojawienie się niesinusoidalnych sił elektromotorycznych w urządzeniach indukcyjnych (silniki, transformatory, dławiki). Zasadniczym problemem jest jednak obciążenie transformatora przekształtnikowym zespołem napędowym, który pobiera niesinusoidalny, odkształcony prąd tak po stronie niskiego jak i średniego napięcia. Problem ten dotyczy nie tylko powszechnie obecnie instalowanych napędów AC, ale także układów napędowych prądu stałego występujących w starszych aplikacjach z lat 70. i 80. ubiegłego wieku zwłaszcza w hutnictwie i górnictwie. Dla ilustracji takiego przypadku wybrano napęd DC samotoków hutniczych zasilany z przemysłowej sieci 6 kV pokazany na rys. 6. Dane transformatora zasilającego napędy DC podano w pozycji 3 tabeli 2.

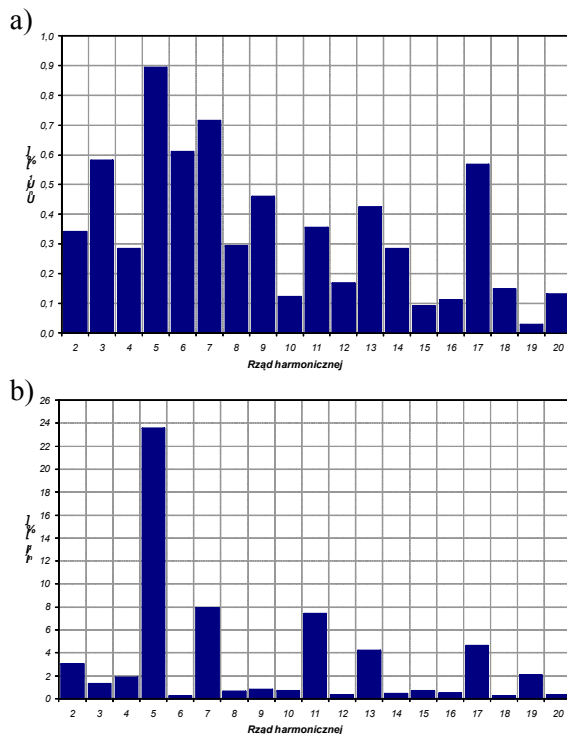


Rys. 6. Schemat zasilania napędów samotoku hutniczego [6].

Na rysunkach 7 i 8 pokazano przebiegi wartości chwilowych napięcia i prądu po stronie 6 kV transformatora olejowego 24T (rys. 6) o mocy znamionowej 704 kVA obciążonego rewersyjnym prostownikiem tyrystorowym 24TP zasilającym zespół 4 silników prądu stałego o mocy po 67 kW każdy oraz rozkłady harmonicznych tych przebiegów.



Rys. 7. Przebieg napięcia i prądu transformatora 24T po stronie 6 kV [6].



Rys. 8. Harmoniczne napięcia i prądu transformatora 24T po stronie 6 kV.

We wszystkich przedstawionych przypadkach odkształcone prądy obciążenia wpływają niekorzystnie na pracę transformatorów przekształtnikowych powodując w nich zwiększenie strat mocy. Podczas pracy transformatora przy napięciu odkształconym wyższe harmoniczne napięcia tworząc strumienie harmoniczne w rdzeniu wpływają na wzrost strat jałowych. Natomiast wyższe harmoniczne prądu przepływając przez uzwojenia, wywołują wzrost strat obciążeniowych transformatora.

### 3. Analiza strat w transformatorach przy przebiegach odkształconych

Transformatory przekształtnikowe są z reguły większe i cięższe od typowych transformatorów zasilających. Różnice te wynikają z celowego

obniżenia indukcji w rdzeniu transformatora jeszcze na etapie jego projektowania. Jest to podyktowane koniecznością ograniczenia nadmiernych strat powodowanych wysoką zawartością wyższych harmonicznych w prądzie wtórnym.

Przy projektowaniu układów napędowych prądu stałego lub/i przemiennego, które zasilane są z przekształtników energoelektronicznych (prostowników sterowanych, przemienników częstotliwości), należy uwzględnić ich negatywny wpływ na kable i transformatory dopasowujące. Generalnie producenci transformatorów trójfazowych średniego napięcia szczególnie dedykowanych jako transformatory przekształtnikowe, podają w swych dokumentacjach techniczno-ruchowych podstawowe parametry, do których zaliczają się: pozorna moc znamionowa, napięcia i prądy znamionowe, napięcie zwarcia, straty mocy w stanie jałowym i obciążeniowym oraz czasami dopuszczalna zawartość wyższych harmonicznych prądu  $THD_I$ .

Dla produkowanych obecnie w kraju transformatorów rozdzielczych średniego napięcia [17, 18] procentowy udział strat jałowych ( $\Delta P_j$ ) w stosunku do strat obciążeniowych ( $\Delta P_{ob}$ ) i strat całkowitych ( $\Sigma \Delta P$ ) o mocach od 250 kVA do 2,5 MVA, napięciu 6 kV/0,4 kV,  $u_z=6\%$ , przedstawiono w tabeli 1.

Straty jałowe, czyli straty w żelazie rdzenia transformatora są niezależne od prądu obciążenia transformatora, a na ich wielkość ma wpływ jedynie wartość i stopień odkształcenia napięcia.

Tabela 1

Procentowe wartości strat jałowych w stosunku do strat obciążeniowych całkowitych [17,18]

Transformatory			
olejowe		żywiczne	
$\Delta P_j / \Delta P_{ob}$	$\Delta P_j / \Sigma \Delta P$	$\Delta P_j / \Delta P_{ob}$	$\Delta P_j / \Sigma \Delta P$
[%]	[%]	[%]	[%]
11,8 ÷ 15	10,5 ÷ 13	19,5 ÷ 26,6	16,3 ÷ 21

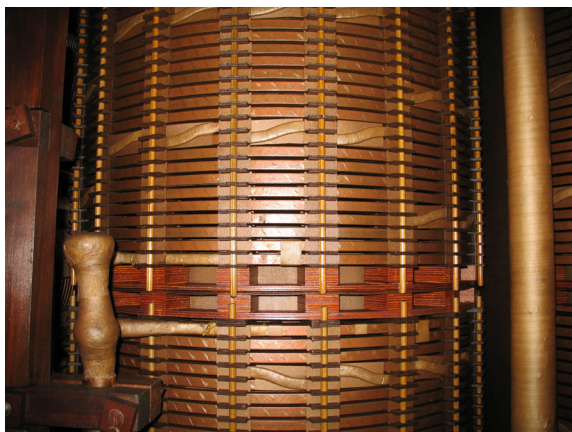
Straty obciążeniowe w transformatorze występują przy przepływie prądu przez uzwojenia pierwotne i wtórne. Można wyodrębnić obciążeniowe straty podstawowe  $\Delta P_{Cu}$  i dodatkowe  $\Delta P_{dod}$ , które można podzielić na straty dodatkowe wywołane przez prądy wirowe: w uzwojeniach  $\Delta P_{wu dod}$  oraz w częściach metalowych  $\Delta P_{wm dod}$ . Bilans ogólnych strat obciążeniowych określony jest wzorem (1):

$$\Delta P_{ob} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{dod} = \Delta P_{Cu} + (\Delta P_{wu dod} + \Delta P_{wm dod}) \quad (1)$$

Obciążeniowe straty podstawowe wynikają z rezystancji uzwojeń. Obciążeniowe straty dodatkowe są wywoływane przez prądy wirowe indukowane w przewodach przez strumienie rozproszenia (składowe podłużne i poprzeczne) powiększone o straty powstające w metalowych częściach konstrukcyjnych oraz w kadzi wywołane przez strumień rozproszenia. Straty dodatkowe w uzwojeniach wynikające z prądów wirowych nie są mierzalne, a jedynie można je obliczyć i zależą od danych uzwojeniowych [3, 9, 10]. Ich wartość stanowi część  $\chi_w$  strat podstawowych  $\Delta P_{Cu}$  określana jako:

$$\Delta P_{wu\ dod} = \chi_w \cdot \Delta P_{Cu} \quad (2)$$

Obniżenie strat wirowych w uzwojeniach można uzyskać zmniejszając przekrój przewodów uzwojenia, ale rosną wówczas straty czynne. Dlatego wykonuje się uzwojenia transformatorów przewodami równoległymi, co pozwala obniżyć zarówno straty wirowe jak i czynne [3]. Aby przy takiej konstrukcji uzwojenia uniknąć powstawania prądów wirowych z powodu niejednakowej długości równoległych przewodów, dla dużych prądów wykonuje się uzwojenia z przeplecieniem (rys. 9).



Rys. 9. Widok uzwojenia kolumny transformatora z wykonanym przeplecieniem

Straty dodatkowe wynikające z prądów wirowych powstające w częściach metalowych transformatora są trudne do oszacowania, jednak możliwe, szczególnie dla dużych jednostek. Sposób obliczeń strat mocy w kadzi i stalowych częściach konstrukcyjnych transformatorów podano w monografii prof. J. Turowskiego [16]. Dla transformatorów olejowych o większych mocach względny przyrost strat mocy  $F_{HL-STR}$  w elementach metalowych transformatora określa norma amerykańska [4] oraz publi-

kacje [5, 19]. W przypadku transformatorów przekształtnikowych w wykonaniu żywicznym, względny przyrost mocy strat w częściach metalowych można pominąć.

Według ostatnich badań [2, 11] straty jałowe w żelazie pochodzące od prądów wirowych oraz straty powstające na skutek istnienia histerezy zależą od wartości harmonicznego napięcia zasilającego. Wskaźnik wzrostu strat jałowych  $K_j$  określany jest zgodnie z relacją (3), przy czym jego wartość najczęściej nie przekracza 1 % deklarowanych strat jałowych.

$$K_j = \frac{\Delta P_{jU}}{\Delta P_j} = \frac{1}{U_N^2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{n_i^{0,6}} \left(\frac{U_i}{U_1}\right)^2 \sum_{i=1}^N U_i^2 \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta P_{jU}$  – przeliczeniowe straty jałowe wynikające z odkształconego napięcia;

$U_N, U_1$  – nominalna wartość napięcia transformatora i skuteczna wartość pierwszej harmonicznego napięcia;

$n_i$  – rząd harmonicznego  $i = 1, \dots, N=40$ .

Odkształcenie prądu i odpowiadające mu wartości wyższych harmonicznego mają istotny wpływ na zwiększenie strat obciążeniowych, szczególnie wirowych w uzwojeniach, a także w częściach konstrukcyjnych transformatora. Współczynnik „K-factor” [1, 3, 13] wzrostu strat dodatkowych wywołanych przez prądy wirowe w uzwojeniach przy prądzie odkształconym w stosunku do strat przy prądzie sinusoidalnym został wprowadzony w normach UL 1561(1994) i UL 1562(1992, 1994) i określony wzorem (4) jako:

$$K = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{I_i}{I_{rms}}\right)^2 (n_i)^2 = \frac{1}{I_{rms}^2} \sum_{i=1}^{\infty} I_i^2 (n_i)^2 \quad (4)$$

W nowszej normie IEEE C57.110 [4] z roku 1998 (aktualizowanej w 2008 r.), a następnie w publikacjach [5, 19] stosuje się wskaźnik strat harmonicznego  $F_{HL}$  o postaci:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i}{I_1}\right)^2 (n_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i}{I_1}\right)^2} \quad (5)$$

gdzie:

$I_i$  – wartości skuteczne poszczególnych harmonicznego prądu;

$I_1$  – wartość skuteczna prądu pierwszej harmonicznego;

$n_i$  – rząd harmonicznej  $i = 1, \dots, N=40$ .

Między wskaźnikami „K-factor” (4) a  $F_{HL}$  (5) zachodzi zależność:

$$K = F_{HL} \frac{\sum_{i=1}^N I_i^2}{I_{rms}^2} \quad (6)$$

gdzie:  $I_{rms}$  – wartość skuteczna znamionowego prądu transformatora.

Z powyższych wzorów wynika, że wartość wskaźnika  $F_{HL}$  zależy jedynie od rozkładu harmonicznych prądu, natomiast na wartość współczynnika  $K$  wpływa również względna wartość prądów harmonicznych w odniesieniu do znamionowego prądu transformatora [4]. W związku z tym wskaźnik  $F_{HL}$  może być stosowany zarówno podczas projektowania nowych transformatorów, jak również w istniejących instalacjach dla eksploatowanych jednostek obciążonych prądem odkształconym.  $F_{HL}$  wykorzystywany jest głównie do określenia strat i sprawności transformatorów zasilających odbiory nieliniowe i obliczania ich mocy dopuszczalnej. Wskaźnik  $K$  stosowany jest dla transformatorów eksploatowanych do obliczenia stopnia obniżenia dopuszczalnej mocy obciążenia, zasadniczo z wykorzystaniem danych pomiarowych prądów obciążenia.

#### 4. Metody wyznaczania stopnia zmniejszenia obciążenia transformatora

Wartość współczynnika  $K$  wpływa negatywnie na stan obciążenia transformatora powodując jego realne obniżenie. W celu określenia wpływu tego parametru na obciążalność transformatora pracującego przy prądach niesinusoidalnych należy porównać odpowiednie straty obciążeniowe dla prądów sinusoidalnych i odkształconych. Wartości strat obciążeniowych dla obu przypadków można zapisać w postaci zależności (7) i (8):

$$\Delta P_{obs} = \Delta P_{Cu} + \chi_w \Delta P_{Cu} = (1 + \chi_w) \Delta P_{Cu} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{obodk} &= \Delta P_{Cuodk} + K \chi_w \Delta P_{Cuodk} = \\ &= (1 + K \chi_w) \Delta P_{Cuodk} \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie straty mocy podstawowe na rezystancjach uzwojeń dla obu przypadków wyliczane są z zależności (9) i (10):

$$\Delta P_{Cu} = R_Z \frac{S_S^2}{U_S^2} \quad (9)$$

$$\Delta P_{Cuodk} = R_Z \frac{S_{odk}^2}{U_{odk}^2} \quad (10)$$

$R_Z$  - rezystancja zastępcza uzwojeń przy prądzie stałym odniesiona do strony pierwotnej [ $\Omega$ ]:

$$R_Z = R_{Cu1} + v^2 R_{Cu2};$$

$v$  - przekładnia transformatora;

$\chi_w$  - wskaźnik strat dodatkowych w uzwojeniach od prądów wirowych [9, 10] zależny od rodzaju, parametrów geometrycznych i wykonania uzwojeń.

$$\delta \Delta P = \frac{\Delta P_{obs}}{\Delta P_{obodk}} = \frac{S_S^2 (1 + \chi_w) U_{odk}^2}{S_{odk}^2 (1 + K \chi_w) U_S^2} \quad (11)$$

Względny stosunek obu tych strat  $\delta \Delta P$  określony relacją (11) i przyrównany do jedności spełnia założenie zachowania niezmienności wartości strat w obu przypadkach. Pozwala to na uzyskanie zależności określającej względną wartość mocy pozornej transformatora obciążonego prądem odkształconym w stosunku do mocy nominalnej  $S_N$  odpowiadającej prądowi sinusoidalnemu  $S_S$  (12) w funkcji parametrów udziału strat  $\chi_w$ , wskaźnika „K-factor” oraz zawartości wyższych harmonicznych napięcia zasilającego  $THD_U$ .

$$\frac{S_{odk}}{S_S} = \sqrt{\frac{(1 + \chi_w)(1 + THD_U^2)}{1 + K \chi_w}} \quad (12)$$

gdzie:  $THD_U^2 = \frac{\sum_{i=2}^N U_i^2}{U_S^2}$  oraz  $U_S = U_1$

$$i \quad U_{odk}^2 = \sum_{i=1}^N U_i^2 \quad (13)$$

Drugim alternatywnym wskaźnikiem dla transformatorów zasilających układy przekształtnikowe jest współczynnik redukcji obciążenia  $K_R$  wynikający z odkształcenia napięć i prądów [1, 3, 12, 14] wyrażony w postaci (14):

$$K_R = \sqrt{1 + \frac{\chi_w}{1 + \chi_w} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{i=2}^N n_i^q \left( \frac{I_i}{I_1} \right)^2} \quad (14)$$

gdzie:

$I_1$ , – wartość skuteczna pierwszej harmonicznej,

$I_i$  – wartość skuteczna  $i$ -tej harmonicznej oraz  $I_i/I_1 = T_i$ ,

$I$  – wartość skuteczna prądu,

$n_i$  – rząd  $i$ -tej harmonicznej,  
 $q$  – stała zależna od rodzaju uzwojenia i czę-  
 stotliwości.

Typowe wartości  $q$  wynoszą 1,7 dla transformatorów, w których obydwie uzwojenia są nawinięte przewodem o przekroju kołowym lub prostokątnym, oraz 1,5 dla transformatorów z uzwojeniem niskiego napięcia nawiniętym przewodem foliowym [1]. W obliczeniach często przyjmuje się średnią wartość stałej  $q = 1,6$ . Konsekwencją wskaźnika redukcji obciążenia mocy transformatora określonego wzorem (14) jest przyjęcie empirycznego współczynnika  $k$  obniżenia mocy transformatora  $S = k \cdot S_N$ , który pozwala na wyznaczenie rzeczywistej mocy transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe. Współczynnik  $k$  oblicza się z wzoru (15) przy założeniu, że w większości przypadków wartość wyrażenia, które mnożone jest przez sumę iloczynów rzędów harmonicznych w potęgę 1,6 i względnych kwadratów prądów harmonicznych wynosi 0,1.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \cdot \left( \sum_{i=2}^{40} n_i^{1,6} \cdot T_i^2 \right)}} \quad (15)$$

Norma IEEE Std C57.110 [4] podaje dodatkowo inne względne wskaźniki strat związane z przepływem niesinusoidalnych prądów transformatora. Zwiększenie strat podstawowych na rezystancji czynnej uzwojeń związanych z efektem wypierania prądu określane jest w normie [4] i publikacjach [5, 19], lecz do ich obliczenia wymagana jest znajomość danych związanych z parametrami uzwojeń (ilości warstw, wysokości pojedynczej warstwy uzwojenia, konduktywności materiału uzwojenia, przenikalności magnetycznej, częstotliwości). Uwzględnienie zjawiska wypierania prądu w prętach uzwojeń pozwala na modyfikację wskaźnika do postaci  $F_{HL}$ . Z uwagi na brak danych konstrukcyjnych dla uzwojeń analizowanych transformatorów zrezygnowano z ich dalszych obliczeń. Kolejnym wskaźnikiem związanym z przyrostem strat wynikających ze strumienia rozproszenia spowodowanego prądem odkształconym w sto-sunku do przebiegu sinusoidalnego jest zgodnie z normą [4] wzór (16):

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{I_i}{I} \right)^2 (n_i)^{0,8} \right]}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{I_i}{I} \right)^2} \quad (16)$$

gdzie poszczególne wielkości użyte we wzorze (16) mają identyczne znaczenie jak w zależności (14).

Znajomość względnych wskaźników strat pozwala na obliczenie względnego maksymalnego dopuszczalnego niesinusoidalnego prądu obciążenia transformatora  $i_{max}$  [4] wg relacji (17):

$$i_{max} = \sqrt{\frac{1 + \chi_w}{1 + F_{HL} \chi_w}} \quad (17)$$

Zależność (17) koresponduje z wyprowadzonym wzorem (12) przy założeniu braku odkształcenia napięcia (wówczas  $THD_U = 0$ ) oraz zbieżności wartościowej i fizycznej współczynnika „K-factor” i wskaźnika strat harmonicznych  $F_{HL}$  określonego w normie [4].

## 5. Wyznaczanie współczynników obniżenia mocy transformatorów w wybranych układach napędowych

Prezentowane na rys. 2, 4 i 7 przebiegi prądów i napięć pochodzą z pomiarów wykonanych na poziomie średniego napięcia po stronach pierwotnych transformatorów zasilających przekształtniki energoelektroniczne prądu przemiennego i stałego. Parametry nominalne transformatorów dla prądów sinusoidalnych zestawiono w tabeli 2, pokazując jednocześnie typ transformatora i sposób chłodzenia.

Tabela 2.

Parametry analizowanych transformatorów

Parametry transformatora	Grupa połączeń, chłodzenie	Charakterystyka obciążenia
<b>TC1:</b> 2,5MVA 6kV/690V $u_z = 5,8\%$ $I_{1rms} = 241A$ $I_{2rms} = 2091A$ $\Delta P_j = 4,5kW$ $\Delta P_{Ob} = 22,1kW$	Dyn5, suchy	Przeziennik częstotliwości zasilający silnik indukcyjny walcarki o mocy 2MW (rys. 1)
<b>TA1:</b> 1,6MVA 6kV/525V $u_z = 6,9\%$ $I_{1rms} = 154A$ $I_{2rms} = 1767A$ $\Delta P_j = 3,4kW$ $\Delta P_{Ob} = 11,14kW$	Dy11, suchy	Kilkanaście przezienników częstotliwości zasilających silniki indukcyjne (rys. 1)

<b>24T:</b> 704kVA 6kV/230V $u_z = 8,9\%$ $I_{1rms} = 67,7A$ $I_{2rms} = 1021A$ $\Delta P_j = 2,1 kW$ $\Delta P_{Ob} = 11,8kW$	Yy0 olejowy	Przekształtnik tyrystorowy DC zasilający kilka silników prądu stałego (rys. 6)
--	----------------	--

Wykorzystując wykresy przedstawiające widma harmonicznym zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów (rys. 3 a-b, 5 a-b i 8 a-b) dla prezentowanych przekształtnikowych układów napędowych zasilanych z transformatorów średniego napięcia sporządzono tabelę 3, w której zestawiono obliczone wartości zawartości wyższych harmonicznym i *THD* dla napięcia i prądu. Z danych liczbowych dotyczących *THD<sub>U</sub>* wynika, iż w każdym z analizowanych przypadków nie występuje widoczne odkształcenie napięcia, co ma swój wpływ na wartość wskaźnika *S<sub>odk/S<sub>S</sub></sub>* (12). Natomiast wskaźnik *F<sub>HL</sub>* wynikający z występowania harmonicznym prądu decyduje o ograniczeniu maksymalnej wartości prądu *i<sub>max</sub>* (17), których wartości obliczone dla poszczególnych transformatorów zostały przedstawione w tabeli 4.

Tabela 3.

Zawartość wyższych harmonicznym i wskaźnik *THD* dla analizowanych transformatorów

Rząd <i>n<sub>i</sub></i>	Zawartość harmonicznym [%]					
	TC1		TA1		T24	
	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>U</i>	<i>I</i>
5	0,99	34,5	0,62	31,7	0,82	20,9
7	0,35	15,2	0,23	14,5	0,82	12,0
11	0,49	7,5	0,30	7,3	0,41	8,4
13	0,31	4,2	0,14	4,0	0,41	6,8
17	0,39	3,2	0,24	3,4	0,61	5,1
19	0,34	2,4	0,21	2,4		4,6
<i>THD</i>	1,65	39,1	1,09	36,1	1,85	27,1

Ponadto w tabeli 4 zestawiono obliczone wartości analizowanych współczynników, które mają istotny wpływ na wartość obniżenia przesyłanej mocy pozornej transformatora, z którego pobierany jest niesinusoidalny prąd obciążenia odbiorników nieliniowych. Na wartość całkowitego współczynnika obniżenia mocy transformatora mają dodatkowo wpływ straty podstawowe wynikające z efektu naskórkowości oraz straty w częściach metalowych transformatora występujące na skutek istnienia strumieni rozproszenia. Poszczególne udziały tych strat są trudne do oszacowania. W tabeli 4 zostały pokazane zasadnicze wskaźniki w postaci  $k = 1/K_R$

oraz *i<sub>max</sub>*, które w istotny sposób określają wartości obniżenia nominalnych mocy dla eksploatowanych od wielu lat transformatorów przekształtnikowych. Przeprowadzone obliczenia były wykonane przy założeniu, że współczynnik udziału dodatkowych strat wiropądowych  $\chi_w$  wynosi 0,12. Wartość ta jest zgodna z danymi podawanymi w literaturze z zakresu budowy i konstrukcji transformatorów [9, 10] oraz cytowanej normy [4].

Tabela 4.

Wartości współczynników obniżających moc analizowanych transformatorów

Wskaźnik	Wartości wskaźników dla transformatorów		
	TC1	TA1	T24
<i>K<sub>j</sub></i>	1	1	1,0007
<i>K</i>	0,81	1,33	1,81
<i>F<sub>HL</sub></i>	5,92	5,30	4,19
<i>K<sub>R</sub></i>	1,12	1,1	1,07
$k = 1/K_R$	0,9	0,91	0,93
<i>F<sub>HL-STR</sub></i>	1,41	1,35	1,22
<i>S<sub>odk/S<sub>S</sub></sub></i>	1,01	0,98	0,96
<i>i<sub>max</sub></i>	0,81	0,83	0,86
<i>I<sub>max dop</sub></i>	195,7 A	127,4 A	58,5 A

Z danych zamieszczonych w tabeli 4 wynika również, że wzrost strat jałowych *K<sub>j</sub>* jest poniżej 0,1% w przypadku niewielkiego odkształcenia napięcia zasilania transformatora o zawartości harmonicznym *THD<sub>U</sub>* nieco poniżej 2%. W przypadku transformatora TC1 dla którego wskaźnik *K* wynosi poniżej jeden (obciążenie ok. 1/3 mocy) występuje jednocentowa nadwyżka względnej mocy dla pobieranego prądu odkształconego w stosunku do mocy przy prądzie sinusoidalnym.

## 6. Podsumowanie

Zastosowanie dużej ilości urządzeń energoelektronicznych do regulowanych układów napędowych powoduje, iż z sieci zasilającej pobierane są prądy niesinusoidalne, które niekorzystnie wpływają nie tylko na parametry pobieranej energii elektrycznej, ale także powodują konieczność obniżenia maksymalnych wartości mocy pozornych przesyłanych przez transformatory przekształtnikowe. To obniżenie mocy wiąże się z występowaniem dodatkowych strat wynikających z istnienia wyższych harmonicznym prądu, napięcia i strumieni magnetycznych rozproszenia.



Na podstawie przeprowadzonych pomiarów napięć i prądów, po analizie zawartości harmonicznycych tych przebiegów oraz po wyznaczeniu wartości współczynników obniżających moc transformatora stwierdzono, że w typowych przekształtnikowych układach napędowych zasilanych z transformatorów SN/nn wpływ odkształcenia napięcia zasilającego jest pomijalny, a istotne znaczenie ma jedynie stopień deformacji prądu obciążenia tj. obecność wyższych harmonicznycych prądu powodujących poprzez straty wirowe dodatkowe nagrzewanie transformatora.

Współcześnie producenci na etapie konstrukcji transformatorów przekształtnikowych uwzględniają wpływ wyższych harmonicznycych prądu na wzrost strat obciążeniowych. Jedną z metod minimalizacji dodatkowych strat obciążeniowych powodowanych przez prądy wirowe jest stosowanie przepieć wewnątrz równoległych przewodów zwoju oraz połączeń międzycewkowych.

Niezależnie od sposobu wykonania transformatora należy pamiętać, że w rzeczywistym przekształtnikowym układzie napędowym zdolność przenoszenia mocy przez transformator przy poborze prądu niesinusoidalnego, jak widać z tabeli 4 obniża się w zakresie ok 15 % w stosunku do prądu nominalnego podanego na tabliczce znamionowej dla obciążenia o sinusoidalnym jego kształcie.

## 7. Literatura

- [1]. Baggini A. (red): *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons, Ltd. England 2008.
- [2]. Carpinelli G., Caramia P., Di Vito E., Losi A., Verde P.: *Probabilistic evaluation of the economical damage due to harmonic losses in industrial energy system*. IEEE Transaction in Power Delivery, Vol.11 N° 2., April, 1996, 1021-1031.
- [3]. Desmet J., Delaere G.: *Harmoniczne. Dopuszczalna obciążalność i dobór transformatorów do pracy z prądem odkształconym*. Jakość zasilania – poradnik cz. 3.5.2, Polskie Centrum Promocji Miedzi, Wrocław 2005.
- [4]. IEEE Std C57.110-2008 *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.
- [5]. Hołdyński G., Skibko Z.: *Problemy związane z eksploatacją transformatorów energetycznych zasilających odbiorniki nieliniowe*. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 5/2010 s. 32-35
- [6]. Jagieła K., Gała M., Kępiński M., Rak J.: *Wykonanie badań i analizy układu pracy transformatorów zawierających PCB znajdujących się na terenie zakładu WBG ISD Huta Częstochowa*. Raport końcowy. Częstochowa 2010 (oprac. niepublikowane)
- [7]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M., Gała M.: *Wpływ rodzaju silników na parametry elektroenergetyczne napędu walcarki prętów miedzianych*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, Nr 71/2005, Katowice, s. 65-70.
- [8]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M.: *Ocena jakości energii elektrycznej pobieranej przez urządzenia technologiczne Huty Miedzi „Cedynia”*. Częstochowa 2001 (oprac. niepublikowane)
- [9]. Jeziński E.: *Transformatory*. WNT, Warszawa 1983
- [10]. Jeziński P., Kozłowska A., Rydzewski Z.: *Obliczanie olejowych transformatorów energetycznych o napięciu do 30 kV*. Politechnika Łódzka, Łódź 1981
- [11]. Kowalski Z.: *Wyznaczanie odchylenia i spadków napięcia w sieciach niskiego napięcia zasilających niesymetryczne i nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej*. Jakość i użytkowanie energii elektrycznej, t.2 z.1, 1996
- [12]. Kulczycki J. (red.): *Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych*. Wyd. PTPiREE Poznań, 2009
- [13]. Kuśmerek A.: *Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 6/2004 s. 636-638.
- [14]. PN-EN 50464-3:2010 *Transformatory rozdzielcze trójfazowe, olejowe, 50 Hz o mocy od 50 kVA do 2500 kVA i najwyższym napięciu urządzenia nie przekraczającym 36 kV -- Część 3: Wyznaczanie mocy znamionowej transformatora obciążonego prądami niesinusoidalnymi*
- [15]. Tunia H., Smirnow A., Nowak M., Barlik R.: *Układy energoelektroniczne. Obliczanie, modelowanie, projektowanie*. WNT, Warszawa 1982
- [16]. Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. WNT Warszawa 1982
- [17]. [www.aveva.transformatory.4b.pl](http://www.aveva.transformatory.4b.pl) [20.02.2011]
- [18]. [www.ftz.pl](http://www.ftz.pl) [20.02.2011]
- [19]. Yazdani-Asrami M., Mirzaie M., Shayegani Akmal A.: *Calculation of Transformer Losses under Non-Sinusoidal Currents Using: Two Analytic Methods and Finite Element Analysis*. World Applied Sciences Journal, Vol.9 N°8, 2010, 889-897.