

Wyższe harmoniczne w trójzwojeniowych transformatorach hutniczych napędów przekształtnikowych

Streszczenie. W praktyce przemysłowej napędy sterowane dużej mocy prądu stałego zasilane są z trójzwojeniowych transformatorów w celu ograniczenia skutków ich negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą. Na przykładzie napędów walcarek rur oraz samotoków hutniczych przedstawiono wyniki analizy prądów pobieranych z sieci elektroenergetycznej przez transformatory trójzwojeniowe. Przedstawiono widma rozkładów wyższych harmonicznych prądów, na bazie których określono stopień obniżenia obciążenia tych transformatorów, jako efekt niesinusoidalnego zasilania odbiorów nieliniowych oraz sformułowano zalecenia i wnioski dotyczące wpływu przebiegów odkształconych na parametry techniczne transformatorów trójzwojeniowych.

Abstract. In industry, the high power controlled dc drives are supplied using three-winding transformers to limit negative effects in the power network. The results of analysis of the currents drawn from the power networks with the use of three-winding transformers are presented. The results were obtained during the work of drive rolls and metallurgical rolling mills. In the paper the higher harmonic of the spectrum distributions of currents are presented. The load reduction ratio of the investigated transformers was determined. This is the effect of non-sinusoidal supply of the nonlinear loads. Furthermore, the recommendations and conclusions that concerned the influence of the distorted waveforms on the performance parameters of the three-winding transformers are formulated in the paper. (**The high harmonics in the three-winding transformers used in metallurgical drive converters**).

Słowa kluczowe: harmoniczne, transformatory trójzwojeniowe,
Keywords: harmonics, three-winding transformers.

doi:10.12915/pe.2014.01.50

Transformatory trójzwojeniowe w strukturach przekształtnikowych hutniczych układów napędowych

Przemysł ciężki, a zwłaszcza hutnictwo i górnictwo, charakteryzuje się znaczną ilością napędów i urządzeń technologicznych wymagających ciągłej regulacji prędkości bądź innych wielkości fizycznych (ciśnienie, przepływ) stosownie do uwarunkowań procesu produkcyjnego. Początkowo, w miarę postępów energoelektroniki wdrażano napędy prądu stałego z prostownikami sterowanymi instalowanymi w obwodach twornika i wzbudzenia, z których szereg pracuje jeszcze do dnia dzisiejszego [5]. W przekształtnikowych układach napędowych dużej mocy od strony sieci zasilającej instalowane są transformatory, które spełniają następujące zadania [7]:

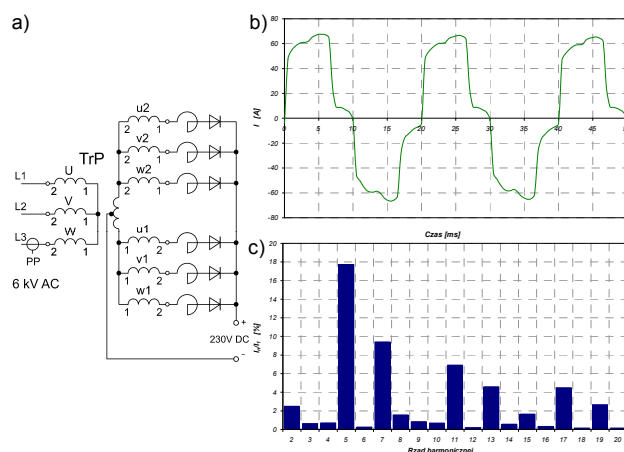
- dostosowują wartości napięcia sieci zasilającej do poziomu napięcia znamionowego silnika napędowego,
- w prostownikach wielopulsowych dostarczają napięcie o przesunięciu fazowym wynikającym z konfiguracji prostownika, często stosowane są wówczas transformatory trójzwojeniowe,
- zmniejszają oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą wynikające z charakteru jego pracy, takie jak wyższe harmoniczne prądów, spadki napięć, zmienny pobór mocy biernej,
- ograniczają wartości prądów zwarciovych w przekształtniku oraz stromość narastania prądu zaworów w stanach komutacyjnych.

W przypadku transformatorów przekształtnikowych istotne znaczenie ma wartość napięcia zwarcia, która jest wyższa niż dla transformatorów rozdzielczych i wynosi od 6 % do 10 %. Zwiększona wielkość reaktancji rozproszenia ogranicza wartość ustaloną prądu zwarcia oraz szybkość jego narastania, co umożliwia koordynację zabezpieczeń nadprądowych i ochronę zaworów przekształtnika.

Analiza harmonicznych prądu transformatora stacji prostownikowej

W ciągu technologicznym walcowni blach w rejonie pieców przepychowych zainstalowane napędy samotokowe prądu stałego zasilane są od strony twornika napięciem stałym 230 V DC. Napięcie stałe dostarczają diodowe stacje prostownikowe, które zasilane są przez transformatory trójzwojeniowe o grupie połączeń

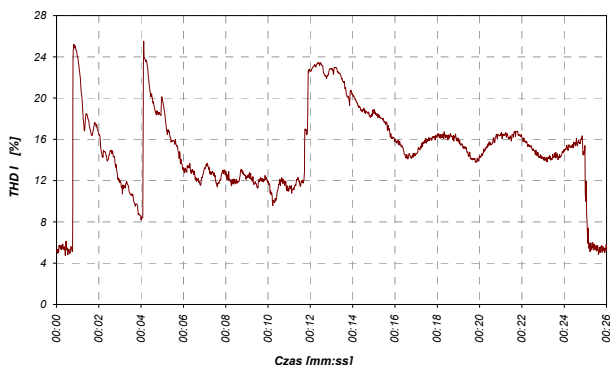
Y/yn0_Tyn6 z dodatkowymi uzwojeniami dławikowymi. Transformatory poprzez dławiki komutacyjne zasilają prostownicze zespoły diodowe połączone w sposób przedstawiony na rysunku 1a.



Rys. 1. Schemat połączeń diodowych stacji prostownikowych z dławikiem wyrównawczym (a) oraz przebieg wartości chwilowych (b) i widmo wyższych harmonicznych prądu (c) po stronie 6 kV transformatora stacji prostownikowej

Obecność dodatkowych uzwojeń spełniających rolę dławików wyrównawczych włączonych pomiędzy punkty gwiazdowe uzwojeń wtórnych transformatora TrP pozwala, przy dwóch uzwojeniach wtórnych dających dwa zespoły napięć trójfazowych (u1-v1-w1 oraz u2-v2-w2) przesuniętych w fazie o 180°, uzyskać prostownik sześciopulsowy. W takiej konfiguracji kąt przewodzenia λ dla poszczególnych diod wynosi 120°. W efekcie prąd pobierany po stronie pierwotnej transformatora (rys. 1b) ma przebieg zbliżony kształtem do prądu zasilania mostka diodowego 6D. Rozkład harmonicznych prądu zasilania transformatora TrP przedstawiony na rysunku 1c jest zatem charakterystyczny dla prostownika 6-pulsowego, i dominują harmoniczne rzędu 5, 7, 11 i 13. Niska zawartość trzeciej harmonicznej oraz jej wielokrotności (6-a, 12-a i 18-a harmoniczne, które są na poziomie poniżej 1 % składowej podstawowej prądu) oznacza, że asymetria obciążenia transformatora przekształtnikowego nie występuje.

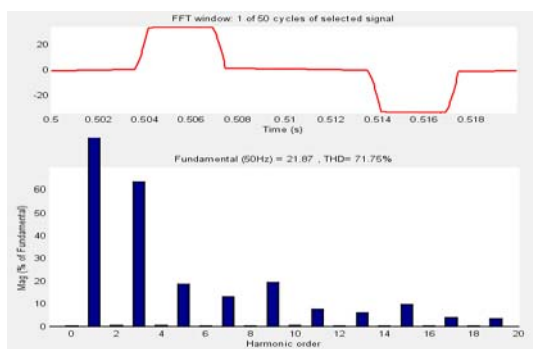
Do oceny stopnia odkształcenia prądu transformatora wyznaczono przebieg współczynnika $THDI$ przy obciążeniu stacji grupą silników (cykl: rozruch oporowy 3-stopniowy i praca transportowa), co pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg współczynnika $THDI$ zawartości wyższych harmonicznych prądu transformatora stacji prostowniczej po stronie 6 kV podczas cyklu pracy grupy silników samotokowych

Maksymalne odkształcenie prądu w stanie obciążenia transformatora nie przekracza 26 %, a wartość średnia w stanie pracy ustalonej wynosi około 15 %.

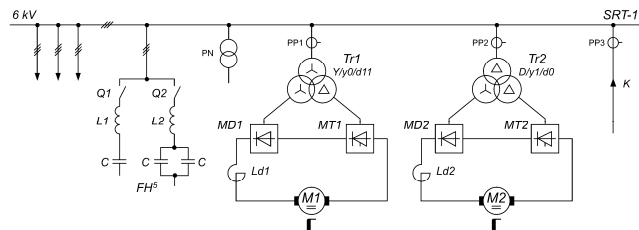
Pierwotnie stacja prostownicowa wyposażona została w transformator olejowy z dodatkowymi uzwojeniami pełniącymi funkcję dławika wyrównawczego. W związku z koniecznością wyeliminowania urządzeń zawierających szkodliwe substancje (PCB) należało rozważyć możliwość zastąpienia tego układu transformatorem trójzwojennym suchym bez dławika wyrównawczego z prostownikiem diodowym w układzie gwiazdy 6-fazowej. Dla porównania obu układów wykonano badania symulacyjne w programie MATLAB-Simulink prostownika 6-pulsowego gwiazdowego z transformatorem $Y/y0/y6$ bez dławika wyrównawczego. Wyniki symulacji przedstawia rysunek 3. Każdy zawór prostownika i cewka uzwojenia wtórnego przewożą prąd przez 1/6 okresu, a faza uzwojenia pierwotnego przez 1/3 okresu. W układzie występuje trzecia harmoniczna prądu i jej wielokrotność, a THD wzrasta do niemal 72%, co ilustruje przebieg prądu i widmo harmonicznych (rys. 3). W rdzeniu transformatora pojawia się strumień magnetyczny o częstotliwości trzykrotnie wyższej niż częstotliwość sieciowa zamykający się przez jarzmo i obudowę, powodując jego silne nagrzewanie, zatem konieczny jest zewnętrzny dławik wyrównawczy. Współcześnie eliminacja trzeciej harmonicznej prądu w transformatorze trójzwojennym zasilającym prostownik w układzie gwiazdy 6-fazowej jest także możliwa za pomocą filtrów aktywnych i kompensacji prądu [1].



Rys. 3. Przebieg prądu fazowego transformatora i jego rozkład harmoniczny w układzie zasilania prostownika 6-pulsowego bez dławika wyrównawczego uzyskany w symulacji komputerowej.

Analiza harmonicznych prądu i napięcia walcarki pielgrzymowej

Szczegółową analizę dystrybucji energii elektrycznej i jej jakości na poziomie średniego napięcia w podstacji z transformatorami trójzwojennymi przeprowadzono na przykładzie napędów głównych walcarek rur bezszwowych. Fragment schematu rozdzielni 6 kV, z której zasilane są prostownikowe napędy główne walcarek oraz dwusekcyjny filtr pasywny L-C umożliwiający kompensację mocy bierniej zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat zasilania zespołu napędów DC walcarek rur z układem kompensacji mocy bierniej [4]

W ciągu technologicznego produkcji rur bezszwowych występują: walcarka pielgrzymowa o mocy 1,9 MW (M1) z dużym momentem bezwładności (koło zamachowe) pracująca przy udarowym obciążeniu oraz walcarka wzdłużna (tzw. alongator) o mocy 1,6 MW (M2) [4, 6]. Oba napędy zasilane są przez jednokierunkowe układy 6D-6T współpracujące z transformatorami trójzwojennymi. Regulacja prędkości silnika napędowego odbywa się przez zmianę napięcia wyprostowanego mostka MT1 w wynikuysterowania go od zakresu pracy inwerterowej (rozruch przy niskim napięciu) do prostowniczej – praca przy napięciu znamionowym. Dane transformatorów przekształtnikowych i filtra biernego piątej harmonicznej przedstawiono w tabeli 1.

Do oceny gospodarki elektroenergetycznej i jakości pobieranej energii elektrycznej zarejestrowano przebiegi napięcia i prądu zasilającego rozdzielnię SRT-1 (przekładniki PN i PP3) oraz prądu transformatora przekształtnikowego Tr1 (przekładnik PP1) napędu walcarki pielgrzymowej (rys. 4) [4].

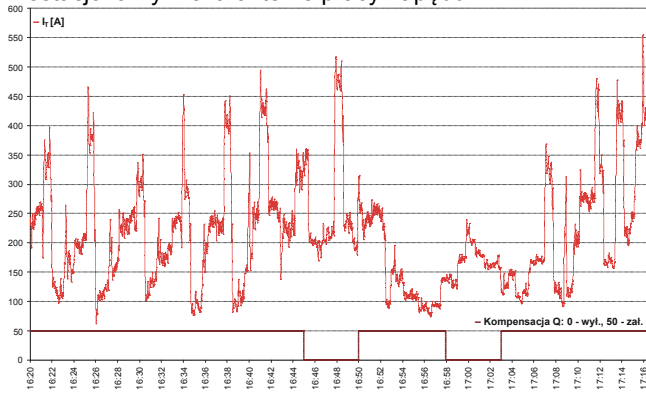
Tabela 1. Parametry urządzeń przesyłowych i filtrujących rozdzielni SRT-1 6 kV

Urządzenie	Parametry techniczne
Transformator Tr1 typ T03Z-3500/6 ELTA	$S_N=3500/1575Y/1925\Delta$ kVA; $U_N=6000/338Y/412\Delta$ V; $u_2\%=8,84\%$; Yy0d11 $I_N=337/2700/2700$ A; $\Delta P_{Cu} = 35840$ W; $\Delta P_j = 4500$ W
Transformator Tr2 typ T03Z-2600-D/6 ELTA	$S_N=2600/1432\Delta/1168Y$ kVA; $U_N=6000/368\Delta/300Y$ V; $u_2\%=6,67\%$; Dy1d0 $I_N=250/2250/2250$ A; $\Delta P_{Cu} = 25660$ W; $\Delta P_j = 4350$ W
Filtr LC – FH ⁵	$L1=20,124$ mH; $R_{F1}=0,50959$ Ω ; $C=19,26$ μ F; $Q_{C3f}=345$ kvar $L2=10,093$ mH; $R_{F2}=0,30473$ Ω ; $C=(19,26 \parallel 19,26)$ μ F; $Q_{C3f}=345$ kvar
Reaktancja systemu na poziomie SRT-1	$X_S = 0,32$ Ω ; $S_{Zw} = 123,75$ MVA

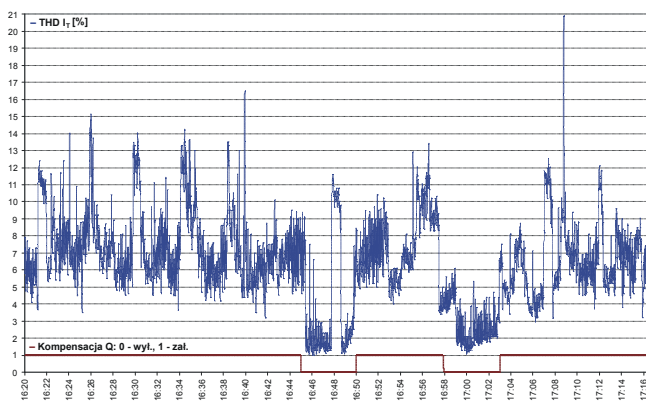
W celu zilustrowania skuteczności filtra 5. harmonicznej na rysunku 5 pokazano przebieg średniego skutecznego prądu fazowego I_T w polu zasilającym rozdzielni SRT-1 obejmujący przedział czasu około 1 godziny. W wybranym przedziale czasu zaznaczone zostały okresy, w których pracował lub był wyłączony filtr 5H stanowiący jednocześnie kompensator mocy bierniej. Następnie w oparciu o analizę FFT uzyskano widmo harmonicznych prądów fazowych zasilających rozdzielnię SRT-1. Umożliwiło to wyznaczenie pokazanego na rysunku 6 profilu zmian wskaźnika zawartości wyższych harmonicznych prądu $THD I_T$ w czasie

zarejestrowanych cykli pracy urządzeń walcowniczych przy złączonym (stan 1) i wyłączonym (stan 0) filtrze.

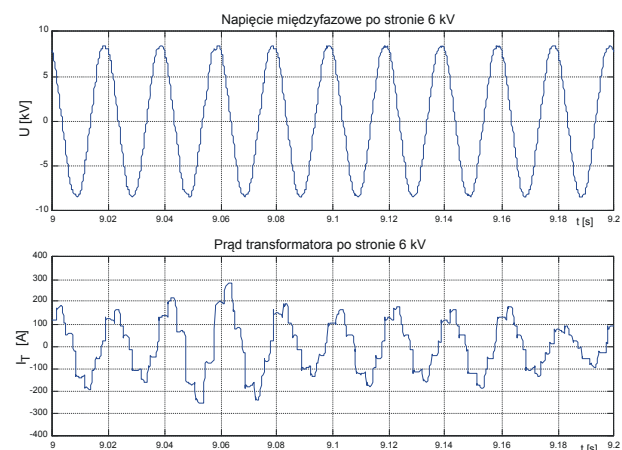
Prąd pobierany przez napęd walcarki pielgrzymowej wynikający z jej obciążenia mechanicznego w trakcie walcowania charakteryzuje się dużymi udarami i stanowi widoczny element składowy w przebiegu wartości skutecznej prądu zasilania rozdzielni zaprezentowanym na rysunku 5. Natomiast wybrany fragment przebiegu prądu transformatora przekształtnikowego Tr1 po stronie górnego napięcia w trakcie cyklu walcowania rury pokazano na rysunku 7. Kształt przebiegu tego prądu świadczy o niestacjonarnym charakterze pracy napędu.



Rys. 5. Przebieg wartości skutecznej prądu zasilania rozdzielni SRT-1 walcarek rur



Rys. 6. Profil zmian współczynnika $THD I_T$ prądu zasilania rozdzielni SRT-1 walcarek rur podczas procesu walcowania

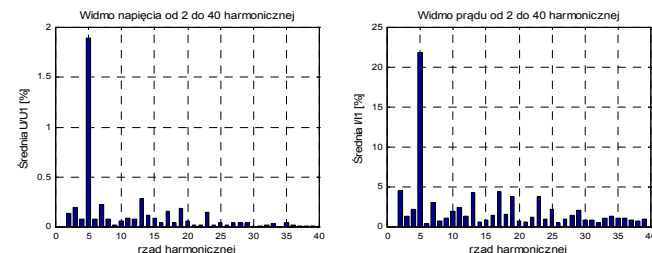


Rys. 7. Przebiegi czasowe napięcia i prądu transformatora na poziomie 6 kV podczas cyklu walcowania

W widmie napięcia (rys. 8) można zaobserwować wyraźną dominację piątej harmonicznej, której wartość nie przekracza jednak poziomu 2 %. Podobne jest spektrum dla widma prądu fazowego. Również tutaj decydującą jest

harmoniczna piąta (ponad 20 %). W trakcie procesu walcowania zawartość piątej harmonicznej oscyluje w przedziale 20-25 %, natomiast poziomy 11-tej i 13-tej harmonicznej są rzędu 4 - 5%.

Wskaźnik $THD I_T$ prądu transformatora Tr1 utrzymuje średnio na poziomie około 24-35 %. Występują jednak przedziały czasu, w których chwilowa wartość wskaźnika zniekształcenia prądu przekracza wartość 70 %.



Rys. 8. Widmo harmonicznych napięcia i prądu dla czasu: 5 s

Stosunkowo znaczna moc zwarcia na szynach rozdzielni

6 kV (tab. 1) pomimo dużego wskaźnika odkształcenia prądu $THD I_T$ pozwala uzyskać niewielkie odkształcenie napięcia, którego miara - wskaźnik $THD U$ tylko chwilowo nieznacznie przekracza wartość 3 %.

Ocena stopnia obniżenia dopuszczalnego obciążenia transformatorów

Obecność wyższych harmonicznych w przebiegach prądu oraz napięcia wpływa negatywnie na stan obciążenia transformatora powodując znaczące obniżenie jego mocy przejściowej. Straty mocy w transformatorze można podzielić na dwie składowe: straty jałowe i obciążeniowe. Straty jałowe występujące w rdzeniu transformatora pochodzą od prądów wirowych oraz histerezy i są niezależne od prądu obciążenia transformatora, a na ich wielkość wpływa jedynie wartość i stopień odkształcenia napięcia zasilającego [7, 8]. Straty obciążeniowe występują przy przepływie prądu przez uzwojenia, przy czym wyróżnia się straty podstawowe i dodatkowe. Obciążeniowe straty podstawowe wynikają z rezystancji uzwojeń transformatora. Natomiast straty obciążeniowe dodatkowe są wywołane przez prądy wirowe indukowane w przewodach przez strumień rozproszenia (składowe podłużne i poprzeczne), powiększone o straty spowodowane przez strumień rozproszenia powstające w metalowych częściach konstrukcyjnych transformatora oraz w kadzi. Odkształcenie prądu i odpowiadające mu spektrum wyższych harmonicznych powodują dodatkowe zwiększenie strat obciążeniowych, zwłaszcza wirowych w uzwojeniach, a także w częściach konstrukcyjnych transformatora. Współczynnik „K-factor” [8] odzwierciedlający wzrost strat dodatkowych wywołanych przez prądy wirowe w uzwojeniach przy prądzie odkształconym w stosunku do strat przy prądzie sinusoidalnym określony jest wzorem (1):

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

gdzie: I_i - wartości skuteczne poszczególnych wyższych harmonicznych prądu do rzędu n ; n_i - rząd harmonicznej $i = 1, \dots, N = 40$; I_{RMS} - wartość skuteczna znamionowego prądu transformatora.

W normie IEEE C57.110 [2] i w publikacji [8] stosuje się wskaźnik przyrostu strat wirowych F_{HL} spowodowany obecnością harmonicznych o postaci:

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

Przyjmując równość strat obciążeniowych w transformatorze przy obciążeniu go prądem sinusoidalnym i prądem odkształconym, tzn. jednakowe warunki termiczne dla obu tych przypadków, można wyprowadzić następującą zależność określającą wymagany stopień zmniejszenia obciążenia transformatora pracującego przy przebiegach odkształconych w odniesieniu do zasilania odbiorów liniowych [7]:

$$(3) \quad \frac{S_{odk}}{S_{sin}} = \sqrt{\frac{(1 + \chi_w)(1 + (THD U)^2)}{1 + F_{HL}\chi_w}}$$

gdzie: $THD U$ – współczynnik zawartości harmoniczných napięcia, S_{sin} – moc obciążenia transformatora przy przebiegach sinusoidalnych, S_{odk} – moc obciążenia transformatora przy przebiegach odkształconych, χ_w – wskaźnik strat dodatkowych w uzwojeniach od prądów wirowych i rozproszenia.

Znajomość wskaźnika przyrostu strat wiroprądowych F_{HL} pozwala na obliczenie względnego maksymalnego niesinusoidalnego prądu obciążenia transformatora i_{max} [7] (dopuszczalnego ze względu na nagrzewanie) wg relacji:

$$(4) \quad i_{max} = \sqrt{\frac{1 + \chi_w}{1 + F_{HL}\chi_w}}$$

Zależność (4) jest algebraicznie identyczna ze wskaźnikiem obniżenia stosunkowej mocy pozornej S_{odk}/S_{sin} przy założeniu sinusoidalnego napięcia zasilającego, co oznacza, że $THD U = 0$ oraz zbieżności wartościowej i fizycznej współczynnika „K-factor” oraz wskaźnika strat harmoniczných F_{HL} określonego w normie IEEE Std C57.110-2008 [2].

Tabela 2. Wartości współczynników obniżających moc analizowanych transformatorów trójzwojennych

Transformator	K	F _{HL}	i _{max}	i _{max dop}
Stacji prostownikowej	1,64	5,95	0,81	78,3 A
Napędu walcarki pielgrzymowej	1,44	6,68	0,788	265,7 A

W tabeli 2 zestawiono obliczone wartości analizowanych współczynników według zależności (1÷4) wykorzystując widma harmoniczných prądów analizowanych transformatorów trójzwojennych. Obecność wyższych harmoniczných prądu ma wpływ na stopień obniżenia przejściowej mocy pozornej transformatora, z którego pobierany jest niesinusoidalny odkształcony prąd zasilania odbiorników nieliniowych. Przeprowadzone obliczenia wykonano przy założeniu, że współczynnik udziału dodatkowych strat wiroprądowych χ_w wynosi 0,12 [7].

Podsumowanie

Hutnicze napędy przekształtnikowe na obecnym etapie rozwoju technologicznego stanowią zasadniczą grupę odbiorów charakteryzującą się silnie nieliniowymi charakterystykami napięciowo-prądowymi. W odróżnieniu od instalacji pieców łukowych i występujących w nich układów transformatorowych, napędy przekształtnikowe z zasady należą do odbiorów o charakterze spokojnym, a ich

praca może być zaburzona na skutek zmian obciążenia lub warunków zasilania.

Występowanie w sieciach przemysłowych urządzeń energoelektroniczných dużej mocy powoduje, iż z sieci zasilającej pobierane są prądy niesinusoidalne. Jednym ze sposobów ograniczenia negatywných skutków ich oddziaływania na warunki pracy urządzeń w sieci elektroenergetycznej jest stosowanie transformatorów trójzwojennych dostarczających system napięć zasilających do prostowników połączonych w konfiguracji układów 12-pulsowych. Podobnie jak dla transformatorów dwuzwojennych, co wykazano w publikacjach Autorów [7, 8], również w przypadku transformatorów trójzwojennych występuje niekorzystne zjawisko obniżenia maksymalnych wartości mocy pozorných przesyłanych przez przekształtnikowe transformatory mocy. Stopień obniżenia mocy, parametrycznie zdefiniowany wskaźnikami K , F_{HL} i i_{max} (tab. 2), wiąże się z występowaniem dodatkowych strat wynikających z istnienia wyższych harmoniczných prądu, napięcia i strumieni magnetycznych rozproszenia. W obu przeanalizowanych przypadkach wynika, że z uwagi na niesinusoidalne prądy transformatorów ich obciążenie nie powinno przekraczać około 80 % wartości nominalnego prądu.

W przypadku transformatora trójzwojennego zasilającego prostownik diodowy układem napięć w konfiguracji gwiazdy sześciofazowej niezbędne jest stosowanie dodatkowego dławika wyrównawczego w celu wyeliminowania dużej (ponad 60 %) składowej trzeciej harmoniczných prądu (rys. 3).

LITERATURA

- [1] Clark S.L., Famouri P., Cooley W.L.: Elimination of Supply Harmonics. IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1997, p. 62-67
- [2] 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
- [3] Jagiela K., Gała M., Kępiński M., Rak J.: Wykonanie badań i analizy układu pracy transformatorów zawierających PCB. Raport końcowy. Częstochowa 2010 (oprac. niepublikowane)
- [4] Jagiela K., Gała M., Rak J., Kępiński M.: Dwusekcyjny filtr piątej harmoniczných do kompensacji mocy biernej napędów walcarek rur. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96), s. 13-18
- [5] Jagiela K., Rak J., Śraniawski J., Węgrzyn A.: Układy energoelektroniczne stosowane w polskim przemyśle hutniczym. Konferencja Naukowo-Techniczna „Energoelektronika na przełomie wieków - rozwój konstrukcji i zastosowania przemysłowe” EZP'2000, Warszawa -Międzyzlesie, 16-17 maja 2000, t. I, s. 41-52
- [6] Rak J. - Oddziaływanie dynamiczne walcarki pielgrzymowej na sieć zasilającą. V Ogólnopolska Konferencja Naukowo -Techniczna „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-5” Kościelisko 20-24 czerwca 2005, Mat. Konferencyjne, tom II, s. 53-60
- [7] Rak J., Gała M., Jagiela K., Kępiński M.: Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne Nr 89/2011, s. 139-147
- [8] Rak J., Gała M., Jagiela K., Kępiński M.: Straty mocy w transformatorach stacji przemysłowych zasilających odbiorniki nieliniowe. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 Nr 4a/2012, s. 60-63

Autorzy: prof. PCz. dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, E-mail: kjagiela@el.pcz.czest.pl; dr inż. Janusz Rak, E-mail: jrak@el.pcz.czest.pl; dr inż. Marek Gała, E-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl; mgr inż. Marian Kępiński, E-mail: mkepinski@el.pcz.czest.pl; Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa