

prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI
dr inż. ARTUR KOZŁOWSKI
mgr inż. JULIAN WOSIK
dr inż. MARIAN KALUS
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

Przenoszenie wyższych harmoniczných generowanych przez odbiory nieliniowe przez transformatory do kablowych sieci zasilających

We współczesnych sieciach przesyłowych coraz częściej występują odbiory nieliniowe – zarówno o małych, jak i znaczących mocach. Ilość odbiorów o stosunkowo małych mocach wzrasta lawinowo i ich wpływ na sieci nie może być pomijany. W artykule scharakteryzowano odbiory nieliniowe oraz ich wpływ na sieci przemysłowe, a w szczególności na zasilające je transformatory. Wyjaśniono konieczność obniżenia dopuszczalnej obciążalności transformatorów obciążonych prądami odkształconymi w stosunku do mocy znamionowej określonej dla przebiegów sinusoidalnych. Przedstawiono i omówiono wyniki badań laboratoryjnych obciążenia transformatora przekształtnikiem mocy w różnych stanach pracy. Sformułowano wnioski końcowe.

1. WSTĘP

W elektroenergetycznych sieciach przemysłowych coraz częściej występują odbiory o charakterze nieliniowym – wielkości elektryczne napięcie i prąd posiadają wówczas przebiegi odkształcone od przebiegów sinusoidalnych. Do odbiorów takich należą między innymi zgrzewarki, spawarki, piece łukowe oraz układy prostownikowe do zasilania silników prądu stałego. Największą grupę odbiorów nieliniowych tworzą urządzenia napędowe o regulowanej prędkości obrotowej.

Najczęściej stosowany układ napędowy stanowi prosty w budowie silnik asynchroniczny zasilany przez energoelektroniczny przekształtnik mocy. Dużej różnorodności przekształtników mocy odpowiada jednak różnorodność ich właściwości. Pobierane zaś przez odbiory nieliniowe prądy odkształcone przenoszone są przez transformatory do sieci zasilających, które w większości są sieciami kablowymi. Odkształcone przebiegi prądów mogą w istotny sposób przyczynić się do zwiększenia strat mocy zarówno w transformatorach, jak i w kablach. Z tego względu istotnym jest poznanie i wyjaśnienie charakteru

wpływu prądów po stronie transformatorów zasilanych sieciami kablowymi w zależności od prądów odbiorów nieliniowych. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych odkształconych przebiegów prądów po obu stronach transformatora o grupie połączeń Yy-O zasilającego przekształtnik mocy wraz z analizą widmową tych prądów. Sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.

2. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Pojawienie się z końcem lat 60. ubiegłego wieku energoelektronicznych przekształtników mocy stworzyło nowy rozdział możliwości w budowie układów napędowych z regulowaną prędkością obrotową, wykorzystujących proste konstrukcyjnie i tanie w eksploatacji silniki asynchroniczne. Obniżające się sukcesywnie ceny elementów i podzespołów energoelektronicznych inicjują lawinowe upowszechnienie się przekształtnikowych układów napędowych. Cechą wspólną konstrukcji tych układów jest ich budowa obejmująca zasadniczo trzy części: wejściowy obwód prostownikowy, sprzęgający obwód LC

i wyjściowy obwód falownikowy o regulowanej częstotliwości.

Dynamiczny rozwój zastosowań układów przekształtnikowych stwarza jednak, niestety, problemy wynikające z ich oddziaływania na sieci zasilające, przejawiające się w występowaniu odkształconych przebiegów tak prądowych, jak i napięciowych. Odkształcone od sinusoidalnego przebiegu okresowo zmienne prądy (i napięcia) można przedstawić w postaci szeregu Fouriera:

$$i = I_{h1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{k>1} I_{hk} \cdot \sin(k\omega_1 t + \varphi_k), \quad (1)$$

gdzie:

k – numer harmonicznej,

I_{hk} – amplituda kolejnej harmonicznej (k -tej),

ω_1 – pulsacja,

φ_k – faza początkowa k -tej harmonicznej.

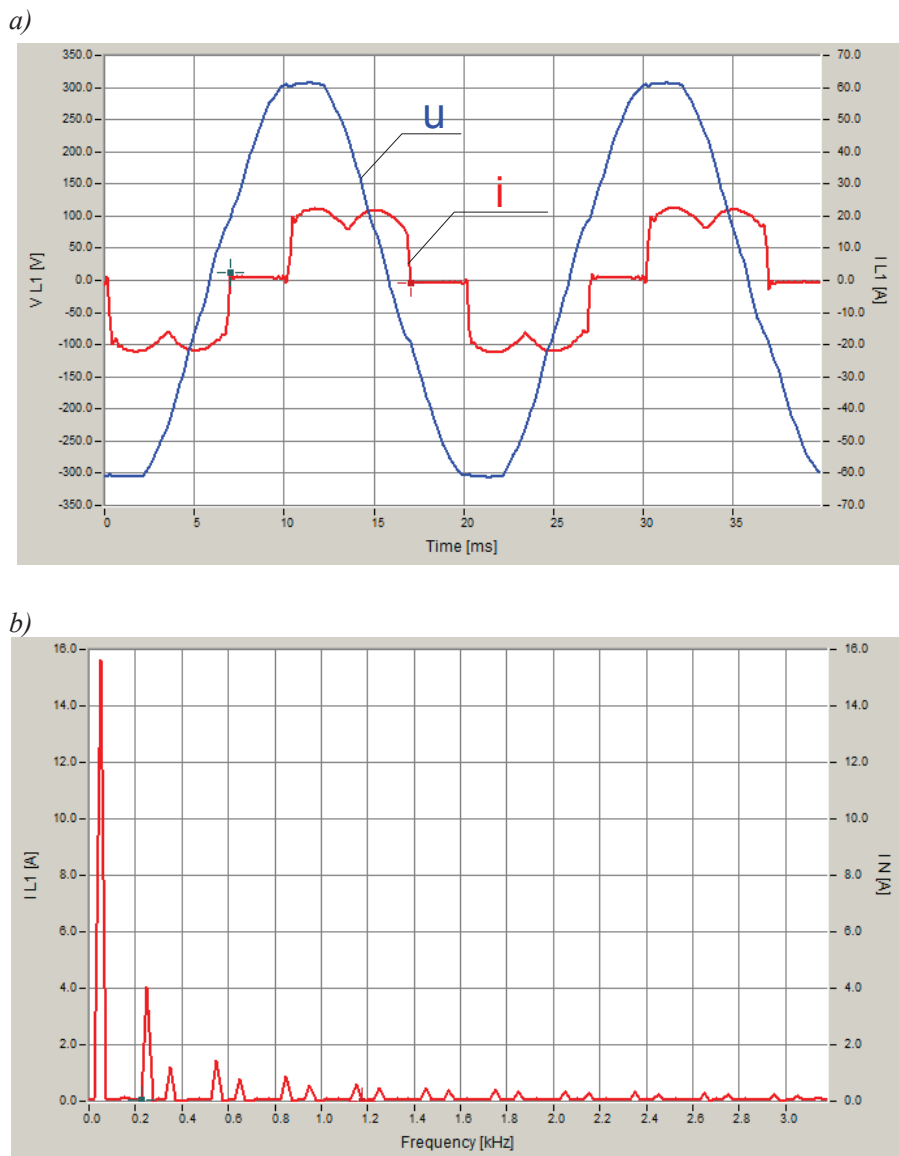
W zależności od konstrukcji prostownika w prądzie pobieranym z sieci występują wyższe harmoniczne charakterystyczne dla tej konstrukcji. Przykładowo dla prostowników 6-pulsowych pojawiają się harmoniczne o numerach:

$$K = 6n \pm 1, \quad (2)$$

tj. 5, 7, 11, 13, 17, 19 ... ,

gdzie $n = 1, 2, 3 \dots$

Przykładowy przebieg prądu w czasie, pobieranego z sieci przez prostownik 6-pulsowy niesterowany, przestawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg napięcia zasilającego „u” i prądu „i” pobieranego przez prostownik 6-pulsowy sterowany (a) oraz widmo harmonicznych prądu (b) [1]

Obecność wyższych harmonicznych w prądzie jest zjawiskiem niepożądanym, przyczyniającym się do występowania zwiększonych strat mocy między innymi w transformatorze, co prowadzi do wzrostu wartości temperatury transformatora, a w konsekwencji – do jego zniszczenia. Do ochrony transformatora przed przyśpieszonym zniszczeniem konieczne jest ograniczenie wartości prądu jego obciążenia (mocy obciążenia) w porównaniu do prądu znamionowego sinusoidalnego (mocy określonej dla przebiegów sinusoidalnych) [1, 2, 4].

Transformator bowiem obciążony odkształconym, w stosunku do sinusoidalnego, prądem można obciążyć mocą:

$$S_h = \frac{S_n}{K}, \quad (3)$$

gdzie:

- S_h – moc pozorna, którą można obciążyć transformator przy obecności wyższych harmonicznych w prądzie,
- S_n – moc pozorna znamionowa (określona dla harmonicznej podstawowej),
- K – współczynnik redukcji mocy transformatora dla danego przebiegu odkształconego.

Wartość współczynnika K określa zależność (4) [4]:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I_\Sigma} \right)^2 \cdot \left[\sum_{k=2}^{k=n} \left(\frac{I_k}{I_1} \right)^2 \cdot k^q \right]}, \quad (4)$$

gdzie:

- e – stosunek strat obciążeniowych dodatkowych przy sinusoidalnym zmiennym prądzie obciążenia do całkowitych strat obciążeniowych, które wystąpiłyby przy prądzie stałym (DC) o identycznej wartości jak wartość skuteczna sinusoidalnie zmiennego prądu obciążenia (orientacyjnie $e = 0,05 \div 0,1$),

I_1 – wartość skuteczna pierwszej harmonicznej prądu obciążenia,

I_Σ – wartość skuteczna prądu obciążenia z uwzględnieniem wszystkich harmonicznych,

I_k – wartość skuteczna wyższej harmonicznej o rzędzie k ,

k – rząd harmonicznej,

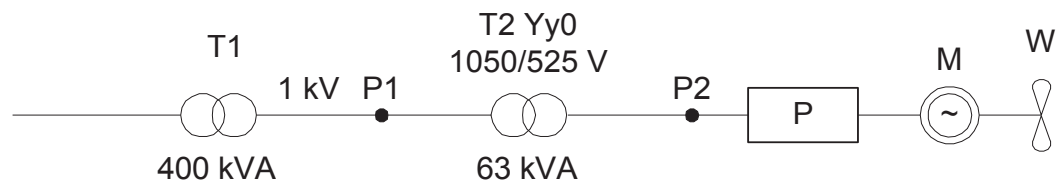
q – wykładnik potęgi zależy od rodzaju wykonania uzwojenia transformatora i częstotliwości prądu (orientacyjnie $q = 1,7$ dla transformatora o uzwojeniach nn i WN wykonanych z drutu o przekroju prostokątnym lub okrągłym i $q = 1,5$ dla uzwojeń foliowych).

W przypadku kabli natomiast występuje również wzrost wartości temperatury metalowych żył tych kabli (efekt występowania zjawiska naskórkowości) oraz wzrost temperatury materiału dielektryka wskutek jego polaryzacji wywołanej oddziaływaniem wyższych harmonicznych napięcia [3]. Mając zatem na uwadze powyższe aspekty, istotnym jest poznanie i wyznaczenie efektu transformacji wyższych harmonicznych, głównie prądu obciążenia odbioru nieliniowego do zasilającej sieci kablowej poprzez transformatory zasilające.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania eksperymentalne przenoszenia wyższych harmonicznych prądu obciążenia odbioru nieliniowego do zasilającej sieci kablowej poprzez transformator przeprowadzono w stacji prób Instytutu EMAG w układzie połączeń jak na rys. 2.

6 kV



Rys. 2. Schemat układu laboratoryjnego do badania przenoszenia wyższych harmonicznych poprzez transformator T2 – transformator 1050 V/525 V Yy0, $S_n = 63$ kVA; P – przekształtnik mocy; M – silnik asynchroniczny 63 kW; W – wentylator lutniowy (obciążenie silnika M); P1, P2 – punkty pomiaru i rejestracji przebiegów napięcia i prądu

Pomiary oraz rejestrację przebiegów napięcia i prądu przeprowadzono zarówno po stronie górnego napięcia (punkt pomiarowy P1), jak i po stronie dolnego napięcia (punkt pomiarowy P2) transformatora T2, z którego zasilany był przekształtnik mocy P.

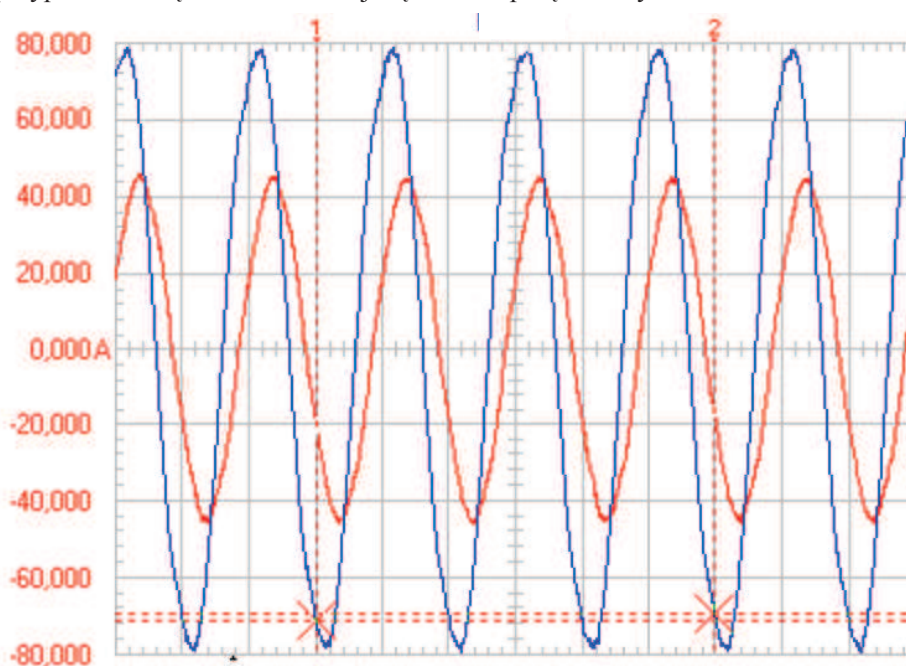
Obciążenie przekształtnika stanowił silnik asynchroniczny klatkowy napędzający wentylator lutniowy, co spowodowało odpowiednią zmianę wartości momentu jego obciążenia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wentylatora.

Badania przebiegów napięć i prądów przeprowadzono dla różnych wartości częstotliwości prądu na wyjściu z falownika (tj. dla różnych prędkości obrotowych silnika) ze zmieniającym się odpowiednio obciążeniem (moment wentylatorowy) w zakresie $f = 50, 40, 30, 20, 10$ Hz.

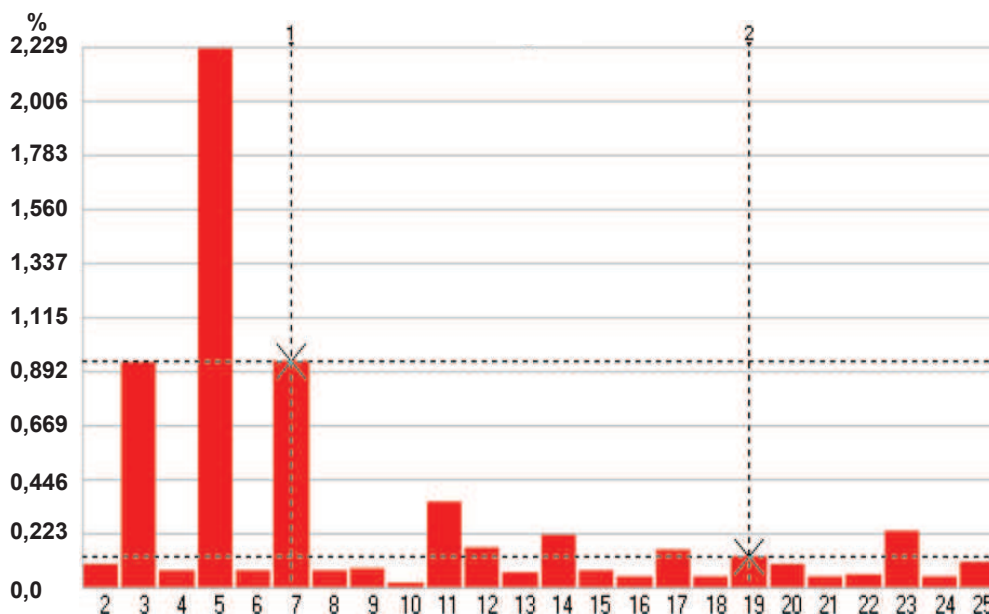
Wybrane pomierzone oraz zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu w czasie dla częstotliwości 50, 40, 10 Hz przedstawiono dla przykładu na rys. 3-8.

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że w przypadku obciążenia silnika najwięk-

szą wartością momentu na wale (co odpowiada znamionowej prędkości obrotowej przy zasilaniu napięciem praktycznie nieodkształconym o częstotliwości 50 Hz) zawartości wyższych harmonicznych w prądzie, a zwłaszcza ich procentowy udział, są na stosunkowo niskim poziomie, nieprzekraczającym na przykład 2% dla 5-tej harmonicznej (rys. 3 i 4). Na uwagę zasługuje tutaj fakt występowania prawie pełnego przetransformowania tych harmonicznych ze strony wtórnej na pierwotną transformatora o grupie połączeń Yy-O.

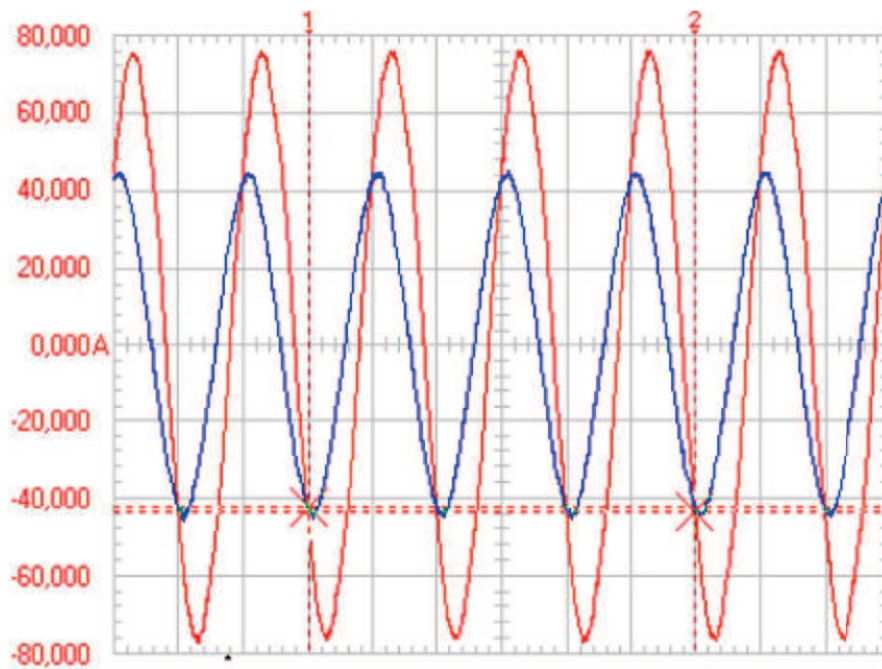


a

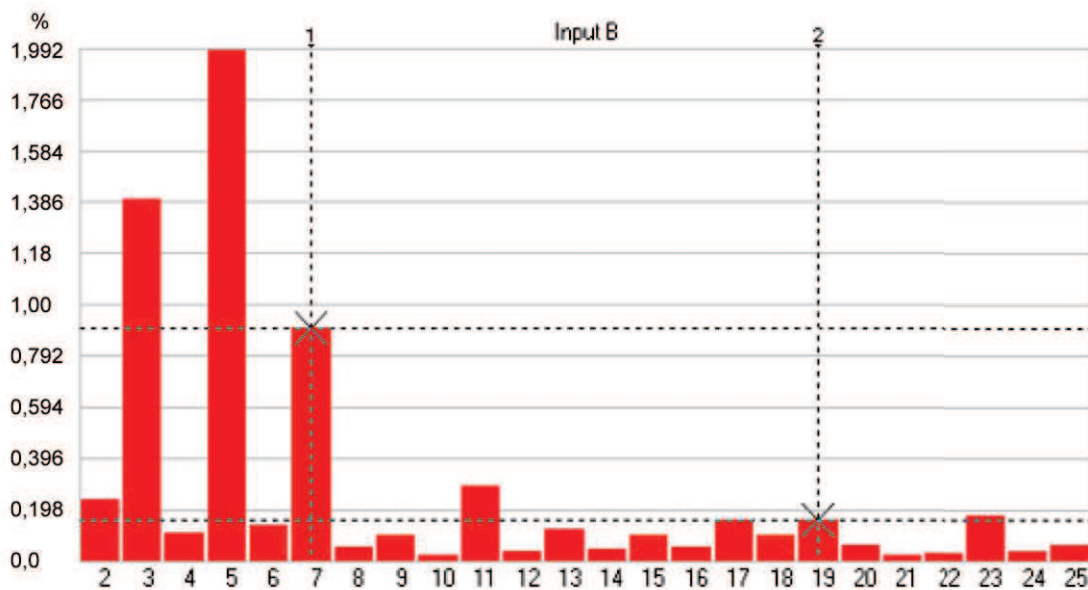


b

Rys. 3. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia pierwotnego transformatora (punkt P1) dla częstotliwości 50 Hz (a) i widmo harmonicznych prądu (b)



a

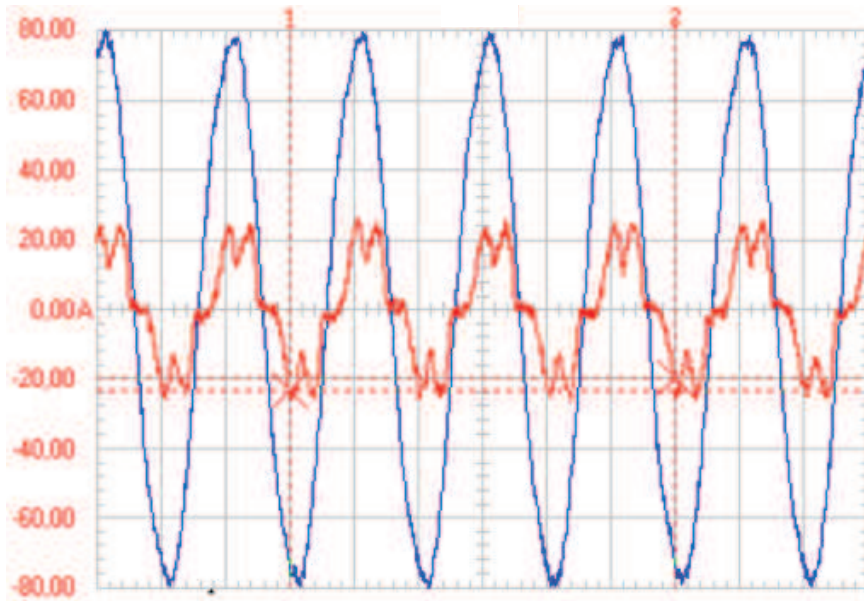


b

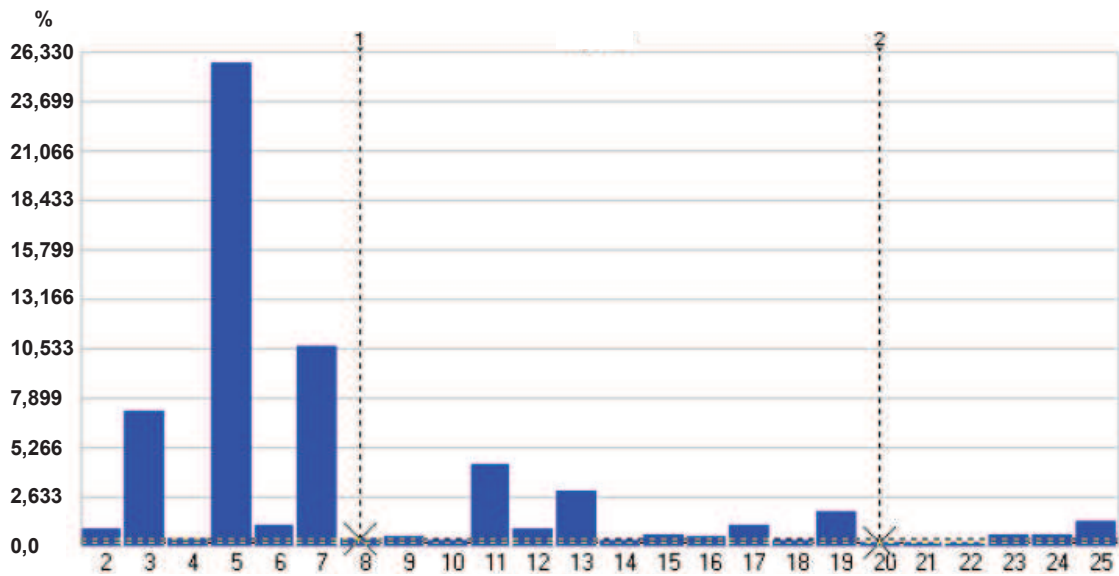
Rys. 4. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia wtórnego transformatora (punkt P2) dla częstotliwości 50 Hz (a) i widmo harmoniczných prądu (b)

Wraz ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej silnika związanej ze zmniejszaniem częstotliwości napięcia zasilania (z przekształtnika mocy) prąd obciążenia transformatora po obu jego stronach wykazuje znaczne odkształcenie od przebiegu sinusoidalnego (rys. 5 i 6). Odpowiednio odkształcenie jest również widoczne w przebiegach napięciowych.

Jednak dla częstotliwości $f = 40$ Hz udział wyższych harmoniczných w prądzie pierwotnym w uzwojeniu wtórnym jest znacznie większy niż w uzwojeniu wtórnym. Dotyczy to zwłaszcza harmoniczných rzędu 5. i 7. (rys. 5 i 6).

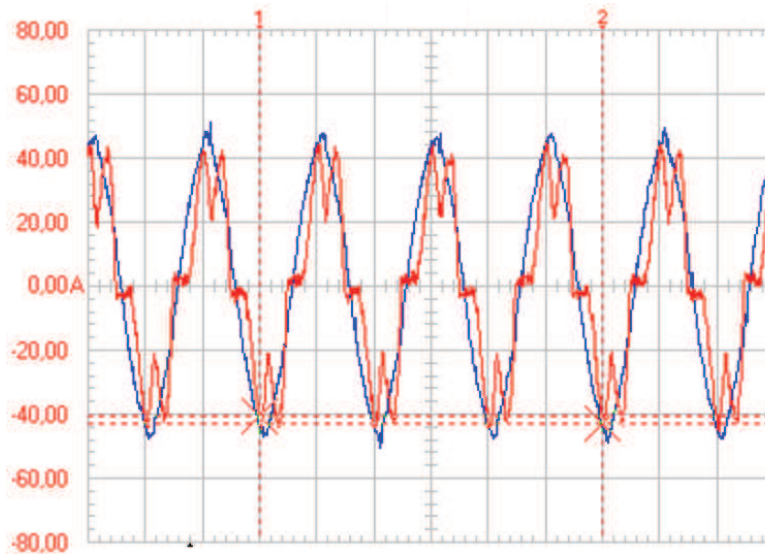


a

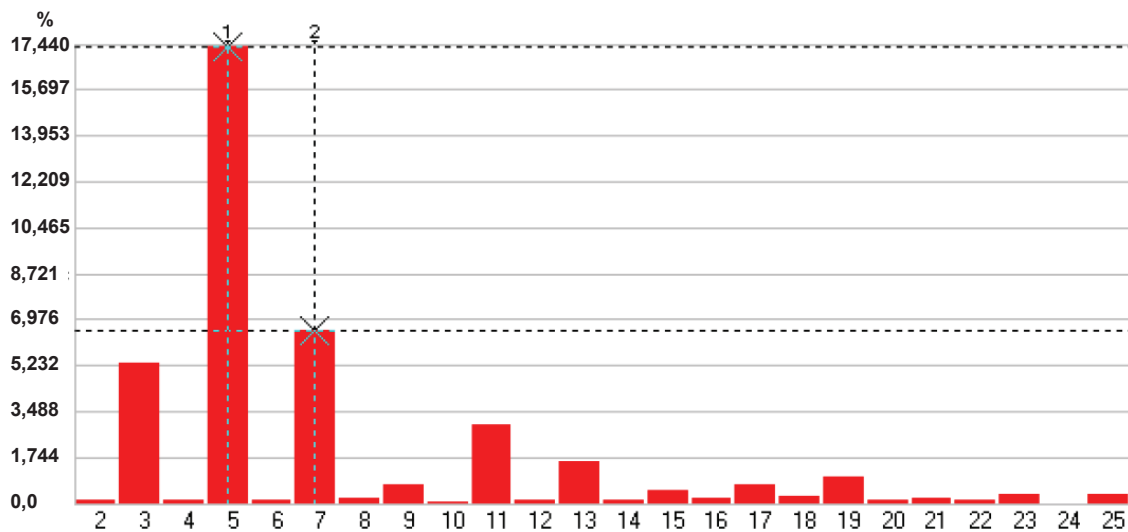


b

Rys. 5. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia pierwotnego transformatora (punkt P1) dla częstotliwości 40 Hz (a) i widmo harmonicznych prądu (b)



a

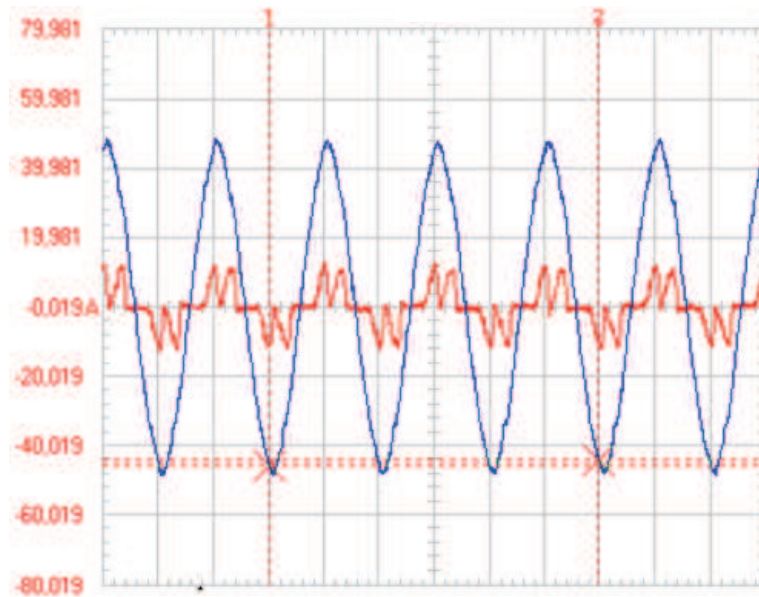


b

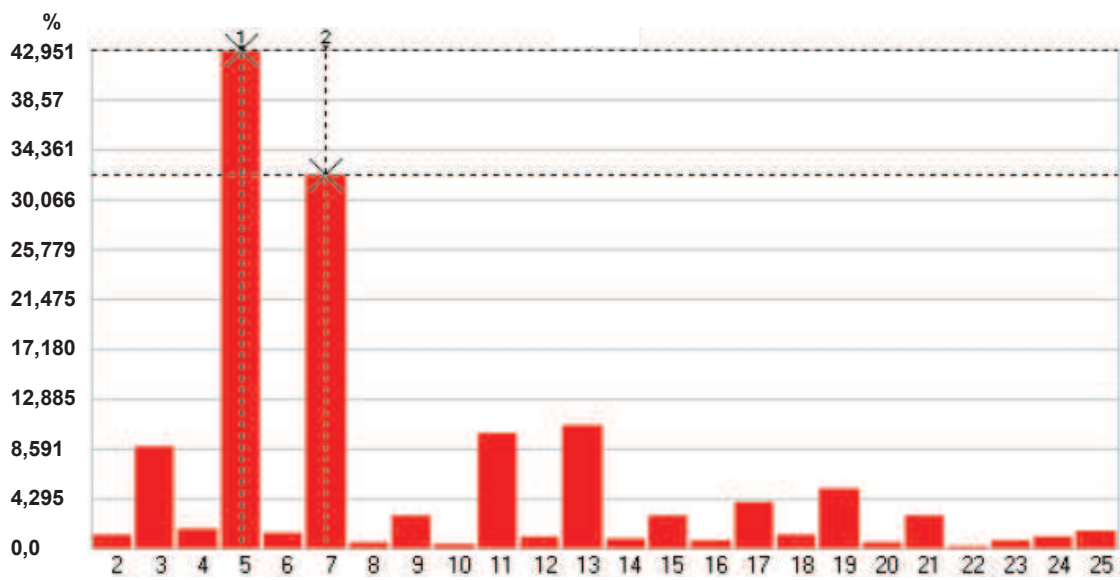
Rys. 6. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia wtórnego transformatora (punkt P2) dla częstotliwości 40 Hz (a) i widmo harmonicznego prądu (b)

Trudno tu jednak jednoznacznie stwierdzić, czy wynika to z większego odkształcenia przebiegu napięciowego tymi harmonicznymi po stronie pierwotnej, czy też z wyższej efektywności transformacji związanej z nieliniowością obwodu magnetycznego transformatora. Podczas dalszego zaś zmniejszania prędkości obrotowej silnika (w tym jego obciążenia na wale) poprzez obniżenie wartości częstotliwości

napięcia zasilającego zawartość harmonicznymi w prądach po obu stronach transformatora w zasadzie nie ulega zmianie, maleje jednak ich udział w prądzie obciążenia uzwojenia pierwotnego, co można zaobserwować dla przykładowych przebiegów pomierzonych dla częstotliwości 10 Hz i pokazanych na rys. 7. i 8.

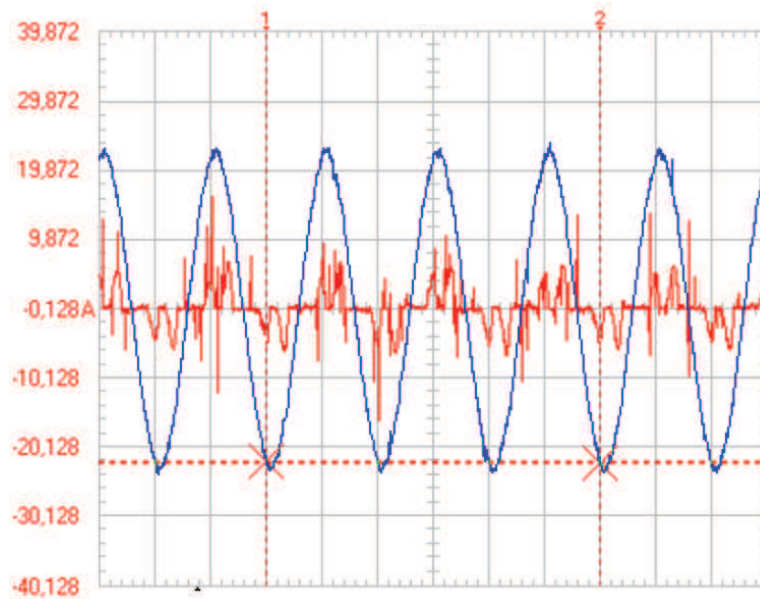


a

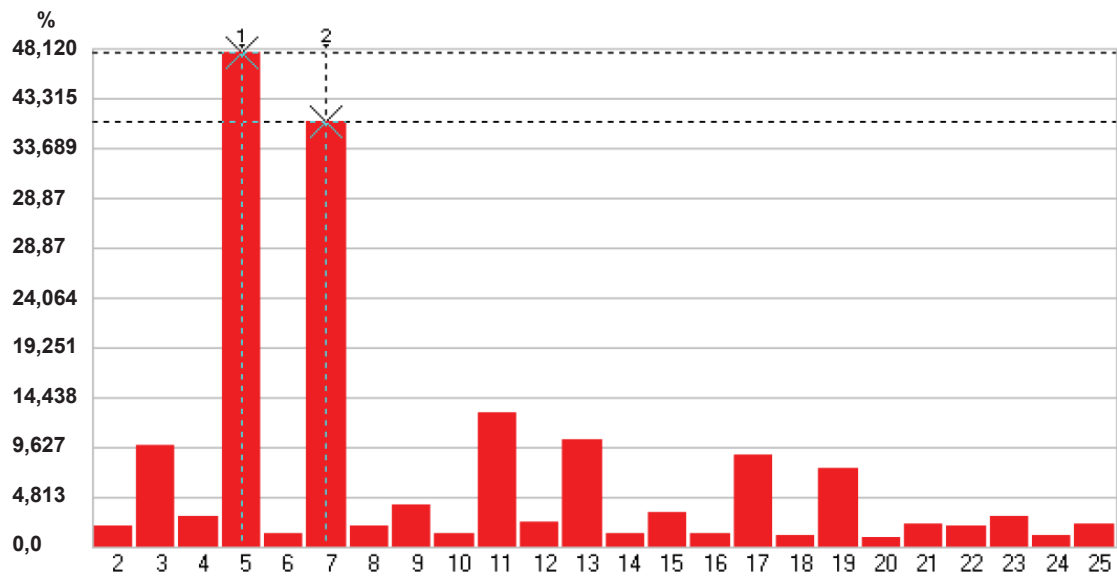


b

Rys. 7. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia pierwotnego transformatora (punkt P1) dla częstotliwości 10 Hz (a) i widmo harmonicznego prądu (b)



a

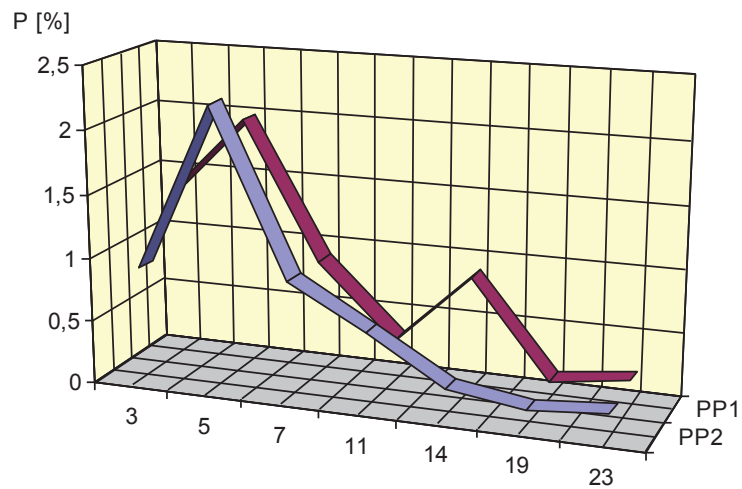


b

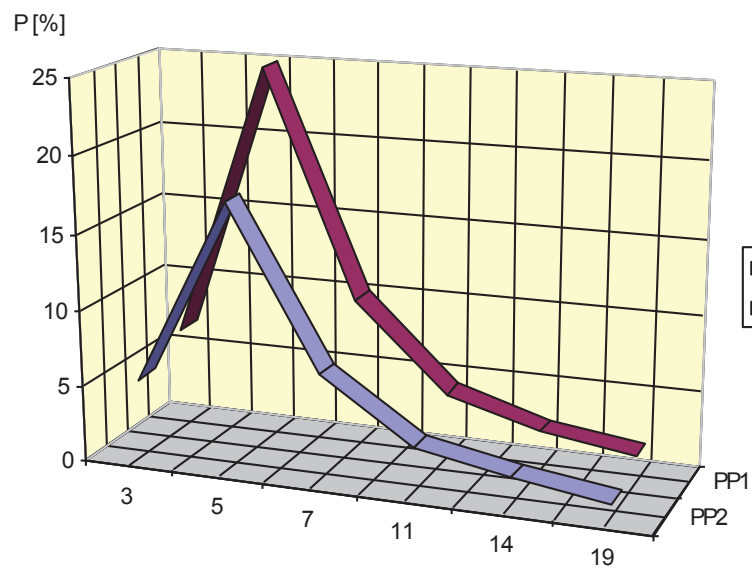
Rys. 8. Przebiegi napięcia zasilającego i prądu obciążenia uzwojenia wtórnego transformatora (punkt P2) dla częstotliwości 10 Hz (a) i widmo harmonicznego prądu (b)

Porównanie zawartości i procentowego udziału wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia transformatora (o grupie połączeń Yy-O) po obu jego stronach dla wybranych częstotliwości napięcia zasil-

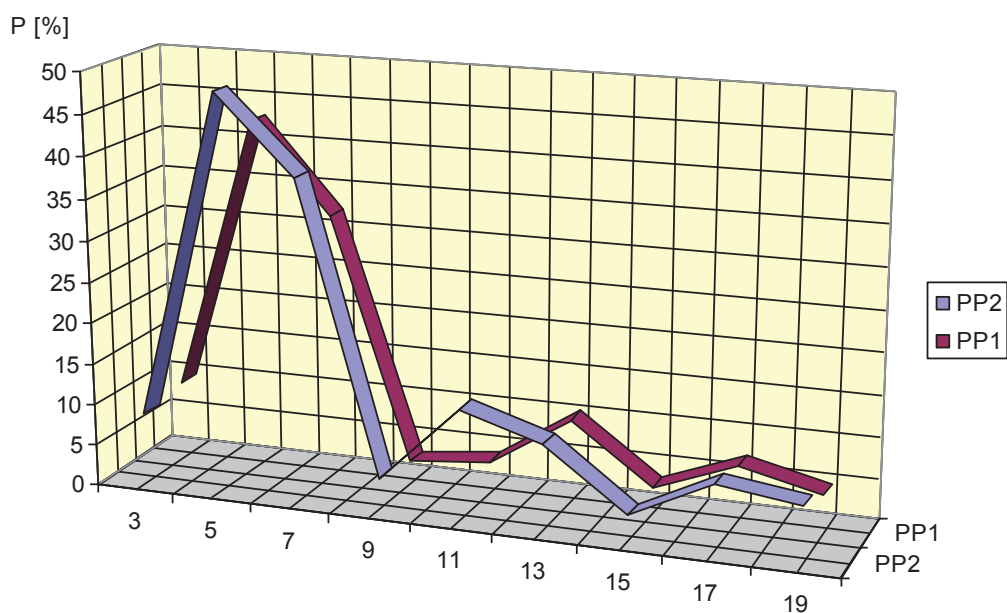
ania silnika, równych 50, 40 i 10 Hz, można dokonać na podstawie odpowiednich krzywych, pokazanych na rys. 9-11.



Rys. 9. Procentowy udział wyższych harmonicznych w prądzie całkowitym obciążenia transformatora po stronie pierwotnej (punkt PP1) i wtórnej (punkt PP2) dla częstotliwości prądu zasilania silnika $f = 50$ Hz



Rys. 10. Procentowy udział wyższych harmonicznych w prądzie całkowitym obciążenia transformatora po stronie pierwotnej (punkt PP1) i wtórnej (punkt PP2) dla częstotliwości prądu zasilania silnika $f = 40$ Hz



Rys. 11. Procentowy udział wyższych harmonicznych w prądzie całkowitym obciążenia transformatora po stronie pierwotnej (punkt PP1) i wtórnej (punkt PP2) dla częstotliwości prądu zasilania silnika $f = 10$ Hz

4. PODSUMOWANIE

Zawartość wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia transformatora w grupie połączeń Yy-O, zasilającego przekształtnik mocy, zależna jest od częstotliwości wyjściowej prądu zasilającego silnik (prędkości obrotowej silnika). Dla dużych prędkości obrotowych (częstotliwość prądu zasilającego silnik zbliżona jest do 50 Hz) zawartość wyższych harmonicznych w prądzie jest stosunkowo niska – na poziomie kilku procent. Wraz jednak ze zmniejszeniem prędkości obrotowej silnika i odkształceniem prądu obciążenia transformatora silnie wzrasta również odpowiednio procentowa zawartość wyższych harmonicznych.

Harmoniczne te są w efekcie transformowane na stronę pierwotną transformatora. Udział jednak harmonicznych charakterystycznych w widmie całkowitego prądu obciążenia po stronie pierwotnej transformatora jest większy niż po stronie wtórnej transformatora dla dużych prędkości obrotowych (wyższych częstotliwości prądu zasilającego silnik). Dla niskich zaś prędkości obrotowych silnika (niższych częstotliwości prądu zasilającego silnik) pomimo tego, że wzrasta procentowa zawartość wyższych harmonicznych w całkowitym prądzie obciążenia uzwojenia wtórnego transformatora, procentowa zawartość wyższych harmonicznych w prądzie po stronie pierwotnej transformatora jest niższa niż po

stronie wtórnej. Występuje zatem silniejsze tłumienie wyższych harmonicznych w transformatorze, a więc w efekcie – w prądzie przepływającym w sieci kablowej zasilającej silnik.

Literatura

1. Kuśnierek Z.: *Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2006, nr 6.
2. Kuśnierek Z.: *Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2008, nr 8.
3. Guzik J., Jakubowska A., Biel B.: *Wpływ zjawisk naskórkowości na pracę urządzeń elektroenergetycznych zasilanych z układów energoelektronicznych*. W: Materiały konferencyjne „Bezpieczeństwo urządzeń transportowych w górnictwie”, CBiDGP Mysłowice, 2012.
4. PN-EN 50464-3:2007. *Trójfazowe olejowe transformatory rozdzielcze 50 Hz od 50 kVA do 2500 kVA o najwyższym napięciu urządzenia nieprzekraczającym 36 kV. Cz. 3: Wyznaczanie mocy znamionowej transformatora obciążonego prądem niesinusoidalnym*.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.