

## BADANIE WPŁYWU SUBHARMONICZNYCH NA PRACĘ TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO W STANIE OBCIĄŻENIA

*Artykuł dotyczy wpływu subharmonicznych napięcia na pracę transformatora jednofazowego pracującego z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym oraz z obciążeniem indukcyjnym. Przedstawiono analizę przebiegów prądu w uzwojeniach transformatora, a także przebiegów napięcia po stronie wtórnej. Dokonano oceny wpływu subharmonicznych napięcia na wartość skuteczną prądu uzwojeń oraz przeprowadzono krytyczną analizę wniosków przedstawionych w dotychczasowych pracach. Badanie wykonano metodą symulacji komputerowej, opierając się na modelu polowym 2D transformatora jednofazowego zaimplementowanego w środowisku Maxwell.*

### WSTĘP

Zaburzeniami jakości napięcia, szczególnie szkodliwymi dla silników indukcyjnych [1, 8], prądnic synchronicznych [13], elektrycznych źródeł światła [13] oraz transformatorów [5], są subharmoniczne napięcia. Są to składowe napięcia o częstotliwości mniejszej od częstotliwości pierwszej harmonicznej. Powstają one w wyniku pracy odbiorników nieliniowych – pieców indukcyjnych [14], falowników [3, 4], cyklokonwerterów oraz tzw. odbiorników niespokojnych, np. pieców łukowych [9]. Innymi źródłami subharmonicznych jest ziemskie pole magnetyczne [11] oraz elektrownie wiatrowe [12].

Źródła subharmonicznych często występują w sieciach średniego lub wysokiego napięcia. Rozważane zaburzenia poprzez transformatory przenikają również do sieci niskiego napięcia. Przykładowo w [2] odnotowano znaczące poziomy subharmonicznych w budynku zlokalizowanym w pobliżu stalowni. Maksymalna wartość pierwiastka z sumy kwadratów subharmonicznych o częstotliwości 5, 10, ... 45 Hz wynosiła 1,67% amplitudy podstawowej harmonicznej. Powyższy przykład ilustruje potrzebę prowadzenia badań dotyczących powstawania subharmonicznych napięcia w systemie elektroenergetycznym.

Problematykę wpływu subharmonicznych napięcia na pracę transformatorów przedstawiono w [5, 6, 7, 10, 11]. W [6] zawarto analizę matematyczną prądu magnesującego transformatora w warunkach zasilania napięciem zawierającym subharmoniczne. W pracach [6, 7, 11] zamieszczono wyniki badań dotyczących

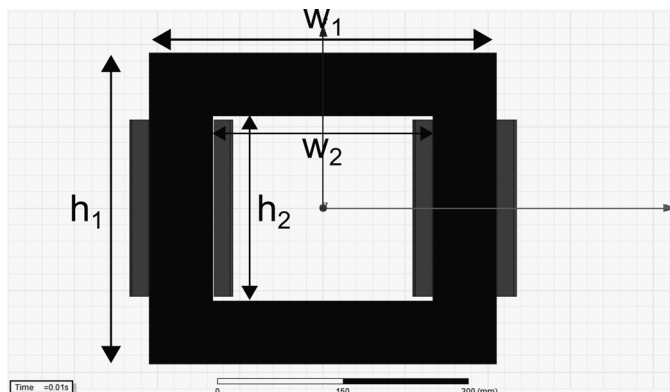
wpływu subharmonicznych napięcia na prąd magnesujący i strumień magnetyczny transformatora w stanie biegu jałowego. W [10] dokonano analizy wpływu rozważanego zaburzenia na prąd magnesujący strumień magnetyczny w stanie biegu jałowego oraz wartość skuteczną i odkształcenia przebiegu prądu strony pierwotnej przy obciążeniu czysto rezystancyjnym.

Podsumowując, należy stwierdzić, że w cytowanych pracach przedstawiono wyniki badań transformatora zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne jedynie w stanie biegu jałowego oraz przy obciążeniu o charakterze czysto rezystancyjnym. Ponadto nie dokonano oceny przenikania subharmonicznych napięcia ze strony pierwotnej na wtórną. W niniejszym artykule porównano wartości skuteczne i odkształcenia przebiegu prądów strony pierwotnej i wtórnej transformatora przy obciążeniu rezystancyjnym i indukcyjnym. Przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące przenikania subharmonicznych napięcia ze strony pierwotnej na wtórną oraz oceniono wpływ subharmonicznych na wartość skuteczną prądu uzwojeń transformatora.

## 1. MODEL POŁOWY TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO

Badania symulacyjne wykonano za pomocą programu zrealizowanego w środowisku Ansoft Maxwell v15 z wykorzystaniem dwuwymiarowego modelu połowego (rys. 1). W środowisku tym zamodelowano transformator typu T1K3A o mocy 4 kVA i napięciu znamionowym strony pierwotnej i wtórnej odpowiednio 380 V i 133 V.

Podstawowe parametry modelu transformatora zamieszczono w tabeli 1, natomiast na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę magnesowania rdzenia (z pominięciem histerezy).

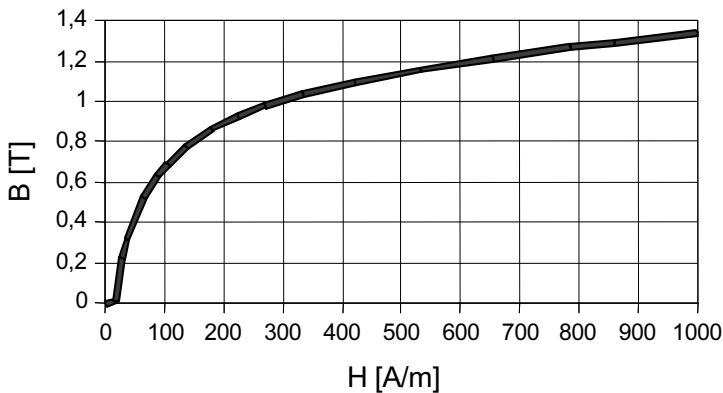


**Rys. 1.** Model transformatora jednofazowego wykorzystanego w symulacjach [7]

**Fig. 1.** Applied model of a one-phase transformer [7]

**Tabela 1.** Podstawowe parametry modelu 2D**Table 1.** Base parameter of the 2D model

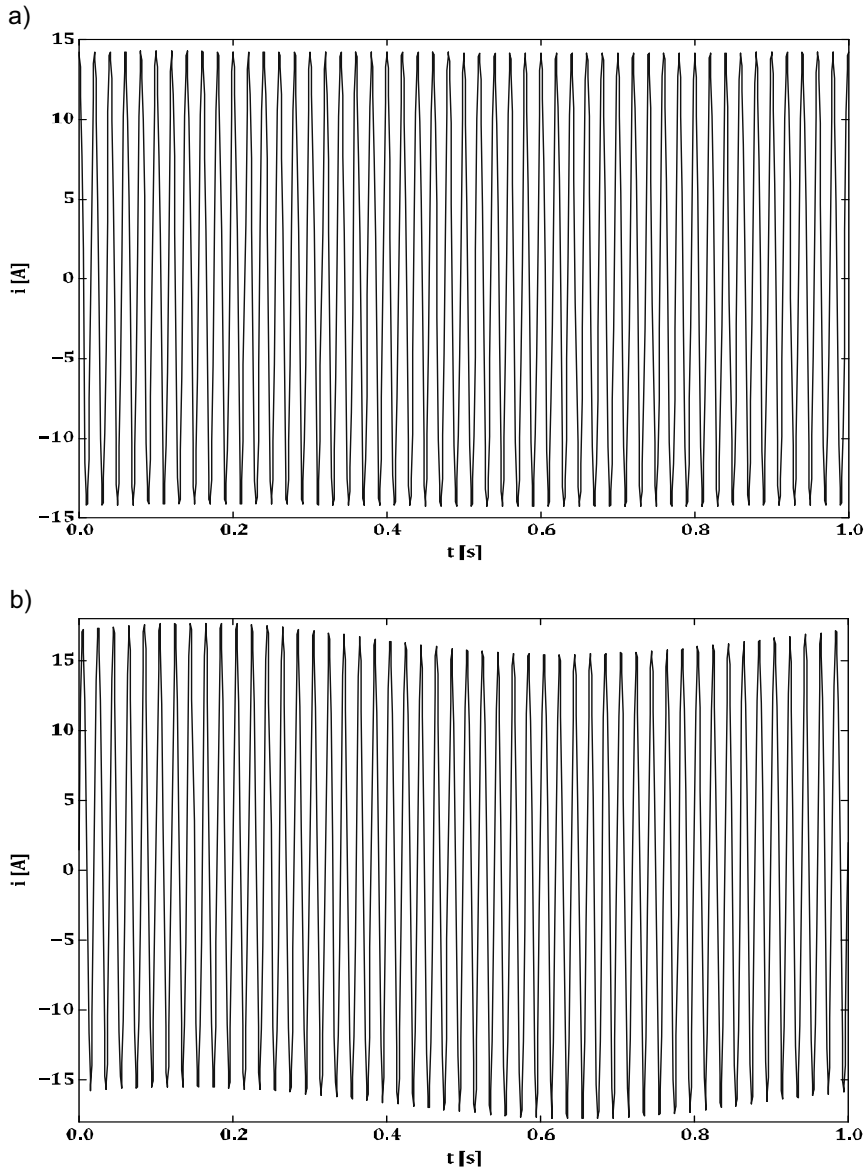
Parametr	Wartość
$h_1$	420 mm
$h_2$	266 mm
$w_1$	380 mm
$w_2$	266 mm
Głębokość	77 mm
Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego	264
Liczba zwojów uzwojenia wtórnego	92
Materiał uzwojenia	miedź
Krok obliczeń	0,1 ms

**Rys. 2.** Charakterystyka magnesowania rdzenia**Fig. 2.** Characteristic of core magnetisation

Model 2D został zasymulowany w trybie *transient* z krokiem obliczeń 0,1 ms. W celu sprawdzenia zbieżności modelu obliczenia powtórzono z krokiem dwukrotnie mniejszym – otrzymane wyniki różniły się o mniej niż 0,2%. Ponieważ na tym etapie badań nie przeprowadzono weryfikacji eksperymentalnej, dla dodatkowej weryfikacji poprawności zrealizowanego modelu polowego przeprowadzono symulacje dla liniowej charakterystyki magnesowania i dla wymuszenia sinusoidalnego. Uzyskane wyniki były prawie identyczne z wartościami otrzymanymi analitycznie (błąd mniejszy niż 0,05%).

## 2. WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawiono wyniki badań transformatora jednofazowego typu T1K3A o mocy 4 kVA i napięciu znamionowym strony pierwotnej i wtórnej odpowiednio 380 V i 133 V, zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 1 Hz i wartości 0,2%  $U_N$ .



**Rys. 3.** Przebieg prądu strony pierwotnej: a) z obciążeniem  $R$ ,  
b) z obciążeniem  $L$

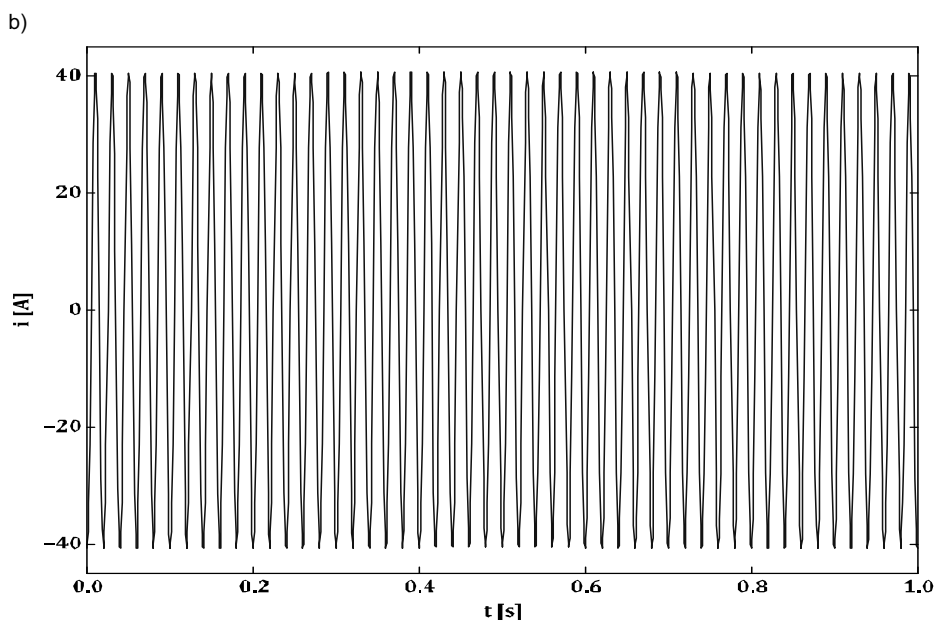
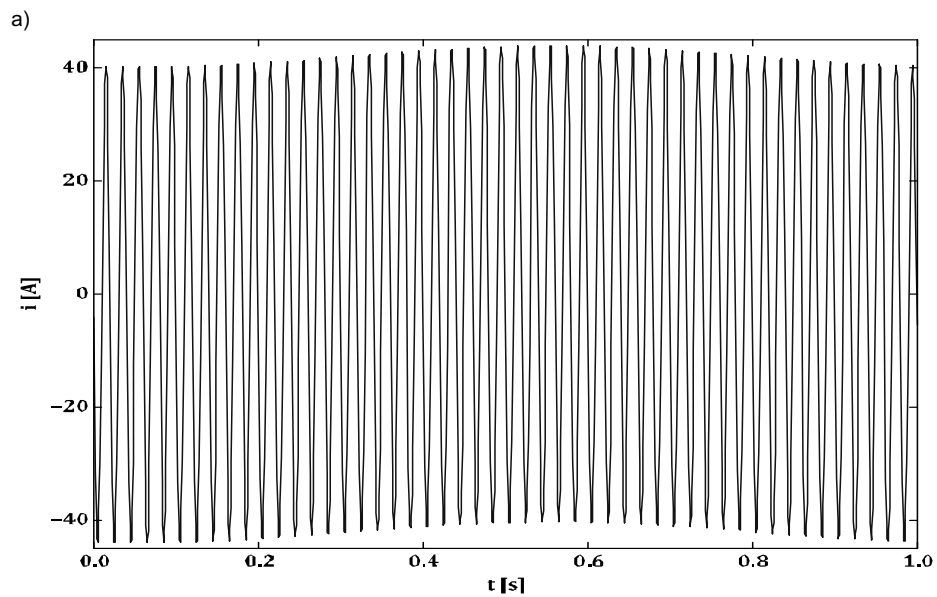
**Fig. 3.** Primary current waveform: a) for a resistive load,  
b) for an inductive load

Na rysunkach 3–5 przedstawiono odpowiednie przebiegi prądu strony pierwotnej, wtórnej oraz widmo prądu strony pierwotnej przy obciążeniu czysto rezystancyjnym (a) oraz indukcyjnym (b). Obliczenia wykonano dla rezystancji obciążenia  $R = 4,43 \Omega$  oraz indukcyjności  $L = 14,1 \text{ mH}$  ( $X_L = 4,43 \Omega$ ). Dla obciążenia czysto rezystancyjnego zawartość subharmonicznej w prądzie strony pierwotnej

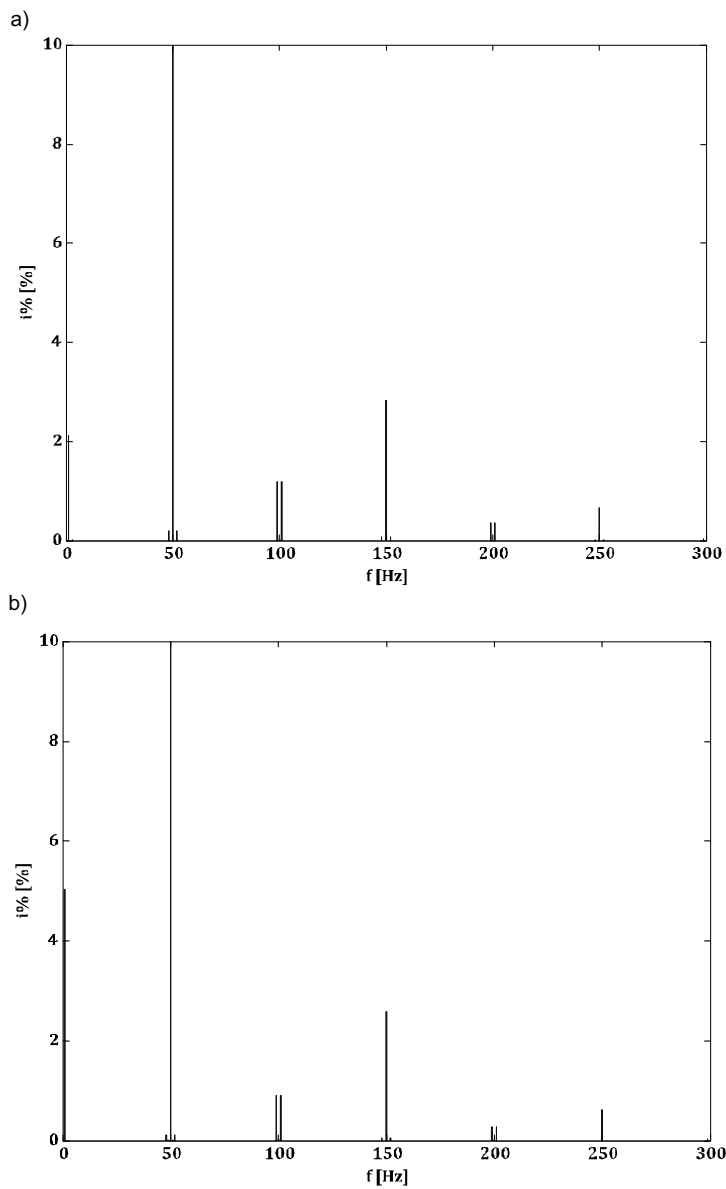
wynosiła 2,1% składowej podstawowej. Ponadto występowały interharmoniczne o częstotliwości 99 Hz i 101 Hz i wartościach 1,2% składowej podstawowej. Dla obciążenia indukcyjnego zawartość subharmonicznej w prądzie strony pierwotnej wynosiła 5% składowej podstawowej, zaś interharmonicznych o częstotliwościach 99 Hz i 100 Hz – ok. 0,9% składowej podstawowej. Z kolei zawartość subharmonicznej w prądzie strony wtórnej wynosiła 0,2% i 4,4% składowej podstawowej przy obciążeniu odpowiednio rezystancyjnym i indukcyjnym. W stanie biegu jałowego napięcie strony wtórnej zawierało subharmoniczną o częstotliwości 1 Hz i wartości 0,2% składowej podstawowej. Natomiast przy obciążeniu rezystancyjnym oraz indukcyjnym zawartość subharmonicznej w napięciu strony wtórnej wynosiła odpowiednio 0,2% i 0,1% składowej podstawowej. Stosunkowo słabe przenikanie subharmonicznej do napięcia strony wtórnej przy obciążeniu indukcyjnym wynika z faktu, że dla subharmonicznej o częstotliwości 1 Hz indukcyjność obciążenia wywoływała praktycznie zwarcie.

Zasilanie napięciem zawierającym składową subharmoniczną spowodowało pomijalny wzrost wartości skutecznej prądu strony wtórnej i pierwotnej transformatora (poniżej 0,4%), będący skutkiem m.in. wzrostu składowej podstawowej prądu magnesującego [7]. Należy podkreślić, że odnotowany wzrost jest wielokrotnie mniejszy od obserwowanego w pracy [10]. Dla transformatora mocy 1 kVA pracującego z obciążeniem rezystancyjnym, przy prądzie strony wtórnej równym 110% prądu znamionowego i zasilaniu napięciem zawierającym subharmoniczną o częstotliwości 1 Hz wartości 0,9%  $U_N$  prąd strony pierwotnej był o ok. 50% większy od znamionowego [10]. Tak znaczący wzrost prądu wynikał z niefortunnego doboru wartości subharmonicznej, co spowodowało nasycenie rdzenia transformatora. W rzeczywistości w systemie elektroenergetycznym nie należy spodziewać się subharmonicznych o częstotliwości ok. 1 Hz i wartości ok. 1%  $U_N$ . Nieodpowiedni dobór wartości subharmonicznej napięcia zarówno do badań w stanie biegu jałowego (co autorzy skrytykowali w pracy [7]), jak i w stanie obciążenia miał istotny wpływ na wnioski końcowe pracy [10]. Podkreślano w nich, że subharmoniczne o bardzo niskiej częstotliwości mogą prowadzić do nasycenia rdzenia transformatora i w konsekwencji – do wzrostu obciążeń cieplnych, nadmiernych wibracji i naprężeń mechanicznych.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wstępne wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule oraz w [7] nie potwierdzają szczególnie niekorzystnego wpływu subharmonicznych napięcia na pracę transformatorów odnotowanego w [10].



**Rys. 4.** Przebieg prądu strony wtórnej: a) z obciążeniem  $R$ , b) z obciążeniem  $L$   
**Fig. 4.** Secondary current waveform: a) for a resistive load, b) for an inductive load



**Rys. 5.** Widmo prądu dla strony pierwotnej: a) z obciążeniem  $R$ , b) z obciążeniem  $L$   
**Fig. 5.** Primary current spectrum: a) for a resistive load, b) for an inductive load

## PODSUMOWANIE

W przypadku badanego transformatora zasilanie napięciem zawierającym subharmoniczne powoduje pomijalny wzrost wartości skutecznej prądu strony pierwotnej i wtórnej. Odkształcenie przebiegów napięcia i prądów strony wtórnej zależy od charakteru obciążenia. Nie potwierdzono szczególnie negatywnych skutków oddziaływania subharmonicznych napięcia na pracę transformatorów, odnotowanych w [10]. Przedstawione wstępne wyniki badań potwierdzają główny wniosek wynikający z artykułu autorów [7]: jest zasadne postawienie hipotezy, że subharmoniczne napięcia są znacznie mniej szkodliwe dla pracy transformatora, niż wskazuje na to istniejący stan wiedzy. Jej potwierdzenie wymaga dalszych prac badawczych.

## LITERATURA

1. Abreu de J.P.G., Emanuel A.E., *Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 1, s. 12–20.
2. Barros J., Apraiz de M., Diego R.I., *Measurement of subharmonics in power voltages*, Power Tech 2007 IEEE Conference, Lausanne (Switzerland), 1–5 July 2007, s. 1736–1740.
3. Chang Garry, Chen Shin-Kuan, Su Huai-Jhe, Wang Ping-Krei, *Accurate assessment of harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed drives under unbalanced supply voltages*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, vol. 26, no. 2, s. 1083–1091.
4. Drabek P., Kus V., *EMC issues of low frequency interference of power electronic converters*, Applied Mechanics and Materials, 2013, no. 284–287, s. 2516–2520.
5. Emanuel E.A., Humi M., *Magnetizing current harmonics, interharmonics and subharmonics an analytical study*, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 26–29 Sept. 2010.
6. Gallo D., Langella R., Testa A., Emanuel A., *On the effects of voltage subharmonics on power transformers: a preliminary study*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2004, s. 501–506.
7. Gnaciński P., Hallmann D., Jankowski P., *Badanie wpływu subharmonicznych napięcia na pracę transformatora jednofazowego*, artykuł przyjęty do Zeszytów Problemowych – Maszyn Elektrycznych.
8. Gnaciński P., Pepliński M., *Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics*, przyjęty do druku w IET Electric Power Applications.
9. Kolagar A.D., Shoulaie A., *Reduction of undesired harmonic components in a steel industrial plant with DC electric arc furnaces*, Proc. of 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2011.
10. Langella R., Testa A., Emanuel A., *On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: single phase units*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, vol. 23, no. 4, s. 2480–2487.



11. Langella R., Testa A., Emanuel A.E., *On the Effects of Subsynchronous Interharmonic Voltages on Power Transformers: Three Phase Units*, IEEE Transactions On Power Delivery, October 2008, vol. 23, no. 4.
12. Schostan S., Dettman K.D., Purellku I., Schulz D., *Harmonics and powers of doubly fed induction generators at balanced sinusoidal voltages*, International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Łagów (Poland), 15–18 June 2010, s. 213–217.
13. Testa A., Langella R., *Power system subharmonics*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Italy 2005.
14. Yılmaz I., Ermis M., Cadırcı I., *Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, no. 4, s. 1203–1214.

## STUDY ON INFLUENCE OF SUBHARMONICS ON SINGLE PHASE TRANSFORMER UNDER LOAD

### Summary

*This work concerns the effect of voltage subharmonics on a single phase transformer under both resistive and reactive load. The secondary voltage and windings current waveforms are analyzed. Windings current rms values are discussed and conclusions resulting from previous works are criticized. The appropriate investigations are carried out with simulation method on the basis of a two-dimensional field model implemented in the environment of Maxwell.*