PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Ukazuje się od 1919 roku

02'15

Organ Stowarzyszenia Elektryków Polskich • Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.

Krzysztof MAJER

Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych

doi:10.15199/48.2015.02.01

Obliczanie hałasu emitowanego przez transformatory.

Streszczenie. *Artykuł przedstawia metodę obliczania hałasu emitowanego przez transformatory trójfazowe w różnych warunkach zasilania i obciążenia. Zaproponowano teoretyczną metodę obliczania harmonicznych drgań magnetostrykcyjnych rdzeni i ich wykorzystania do przybliżonego obliczania hałasu emitowanego przez transformatory. W rozważaniach przeprowadzonych w zakresie częstotliwości od 50 do 1000Hz uwzględniono także hałas emitowany przez uzwojenia i specyfikę transformatorów przekształtnikowych. Określono współczynniki wzrostu hałasu wypadkowego transformatora przekształtnikowego wynikające z hałasu uzwojeń wiodących niesinusoidalne prądy.*

Abstract*. This paper presents a method for calculating the noise emitted by the three-phase transformers operating with different values of load current and for different values of supply voltage (induction in the core). The theoretical method to determine the content of higher harmonics of magnetostrictive vibrations of the cores was* developed. *The discussion carried out in the frequency range from 50 to 1000 Hz is also taken into account the specificity of converter transformers. For the three-phase converter transformers the factors have been identified responsible for the increase of the noise due to vibration of transformer windings with nonsinusoidal currents.* ***Calculation of noise emitted by transformers***

Słowa kluczowe: transformatory, drgania , hałas, magnetostrykcja.
Keywords: transformers, vibrations, noise, magnetostriction.

Wprowadzenie

Źródłem hałasu transformatorów energetycznych jest rdzeń magnetyczny, uzwojenia oraz układ chłodzenia. Dla typowej konstrukcji transformatora energetycznego podstawowym źródłem hałasu jest drgający rdzeń. Przy konstrukcjach o obniżonej znamionowej indukcji pracy, transformatorach dużej mocy, oraz dla transformatorów wiodących odkształcone prądy, zaczyna odgrywać istotną rolę także hałas generowany przez uzwojenia. Hałas generowany przez układ chłodzenia należy uwzględniać tylko dla jednostek dużych mocy.

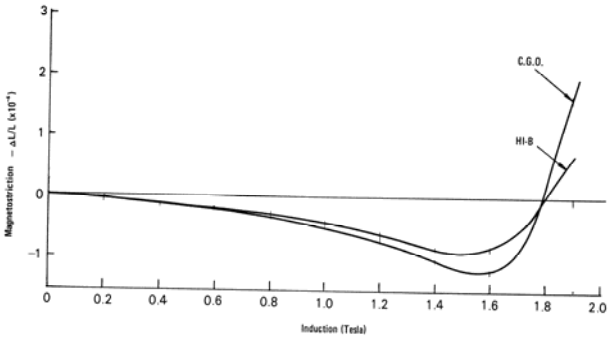
Zasadniczym źródłem dźwięku w transformatorze jest drgający rdzeń pobudzany do drgań siłami magnetycznymi i magnetostrykcyjnymi [1], [8], [9], [10]. Przy obecnie stosowanych sposobach zaplatania rdzeni, siły magnetostrykcyjne osiągają wartości zdecydowanie większe od sił magnetycznych i decydują o hałasie generowanym przez rdzeń transformatora.

Na skutek działania sił magnetostrykcyjnych powstają okresowe drgania rdzenia zależne od indukcji w rdzeniu, współczynnika magnetostrykcji blachy, z której wykonany jest rdzeń oraz sposobu jego zaplatania. Wartość współczynnika magnetostrykcji zależy od wartości chwilowej indukcji występującej w magnesowanej blasze i zawiera harmoniczne będące wielokrotnością harmonicznej napięcia zasilającego.

Obliczenia harmonicznych drgań magnetostrykcyjnych

Magnetostrykcja, czyli zmiana wymiarów blachy elektrotechnicznej pod wpływem strumienia magnetycznego, może być dodatnia lub ujemna.

Dla blachy transformatorowej do indukcji około 1,6 - 1,8T (w zależności od gatunku blachy) następuje kurczenie się blachy (magnetostrykcja ujemna), po osiągnięciu minimalnej długości blacha wydłuża się, przechodząc dla indukcji większych od około 1,8T na magnetostrykcję dodatnią. Wpływa to oczywiście na zawartość poszczególnych harmonicznych w przebiegu chwilowym drgań i wydłużenie całkowite kolumny.

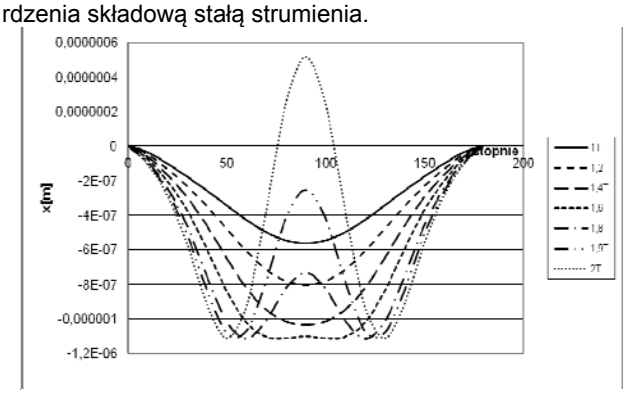


Rys.1 Przebieg magnetostrykcji w funkcji wartości maksymalnej indukcji dla blachy transformatorowej [12], [13]

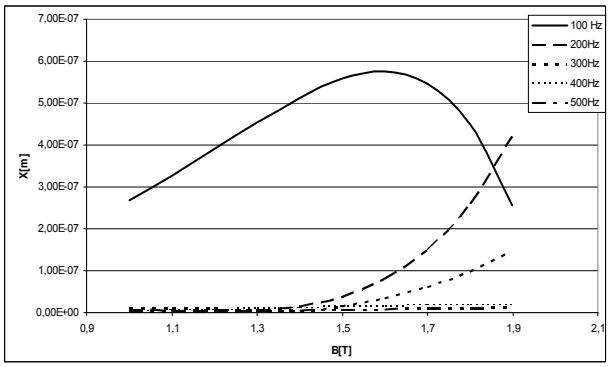
Na rysunku 1 przedstawiono katalogowe przebiegi odkształceń magnetostrykcyjnych w funkcji indukcji dla różnych gatunków blachy transformatorowej [12], [13]. Przy sinusoidalnym napięciu zasilającym uzwojenie magnesujące rdzenia transformatora możemy obliczyć, korzystając z charakterystyk z rysunku 1, przebieg wartości chwilowych odkształceń dla danego gatunku blachy. Rysunek 2 przedstawia obliczone dla wybranego gatunku blachy transformatorowej przemieszczenia, dla jednego półokresu zmienności napięcia zasilającego i różnych wartości indukcji maksymalnej w rdzeniu.

Poddając obliczone przebiegi analizie harmonicznej, otrzymujemy zawartość poszczególnych harmonicznych dla danej indukcji maksymalnej w blasze (rys.3). W ten sposób można wyznaczyć współczynniki magnetostrykcji blachy transformatorowej dla poszczególnych harmonicznych

drgań i danej indukcji maksymalnej w rdzeniu. Jak widać z rysunku 3, w rozpatrywanym przypadku mamy harmoniczne będące parzystymi wielokrotnościami częstotliwości sieci zasilającej, typowe dla transformatora energetycznego. Drgania magnetostrykcyjne mogą zawierać także harmoniczne nieparzyste, w przypadku podmagnesowania rdzenia składową stałą strumienia.



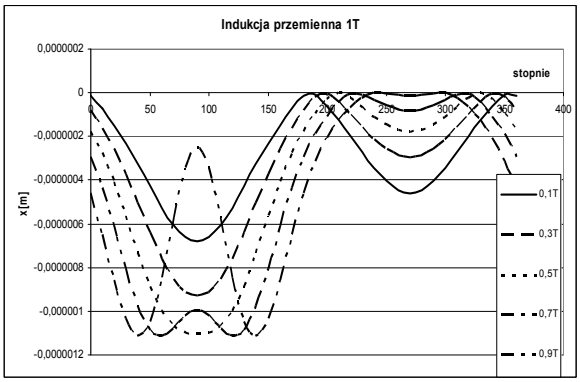
Rys.2. Obliczone przebiegi wartości chwilowej odkształceń magnetostrykcyjnych dla jednego półokresu dla różnych wartości maksymalnych indukcji składowej przemiennej.



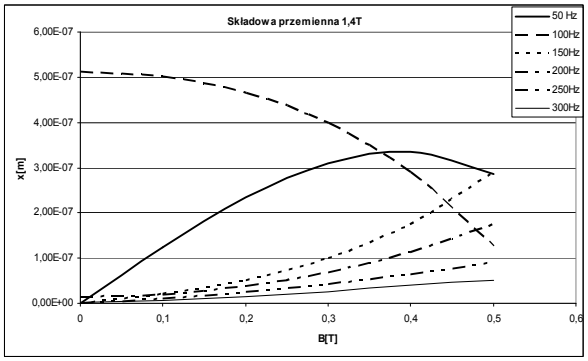
Rys.3. Obliczone harmoniczne drgań magnetostrykcyjnych dla przebiegów z rysunku 2.

Rysunek 4 prezentuje obliczone przebiegi wartości chwilowej odkształceń magnetostrykcyjnych dla różnych wartości indukcji podmagnesowującej i stałej indukcji składowej przemiennej, a rysunek 5 obliczone dla tych przebiegów harmoniczne współczynników magnetostrykcji.

W przypadku podmagnesowania rdzenia składową stałą strumienia występują w widmie drgań magnetostrykcyjnych także harmoniczne nieparzyste (150, 250... Hz), których amplitudy, przy określonych wartościach indukcji składowej stałej i przemiennej mogą przekraczać amplitudy harmonicznych parzystych. Zmieniają one barwę dźwięku emitowanego przez rdzeń.



Rys.4. Obliczone przebiegi wartości chwilowej odkształceń magneto-strykcyjnych dla różnych wartości indukcji podmagnesowującej i indukcji składowej przemiennej równej 1T.



Rys.5. Obliczone harmoniczne drgań magnetostrykcyjnych dla stałej indukcji składowej przemiennej (1,4T) w funkcji indukcji podmagnesowującej.

Obliczanie drgań własnych i wymuszonych transformatorów.

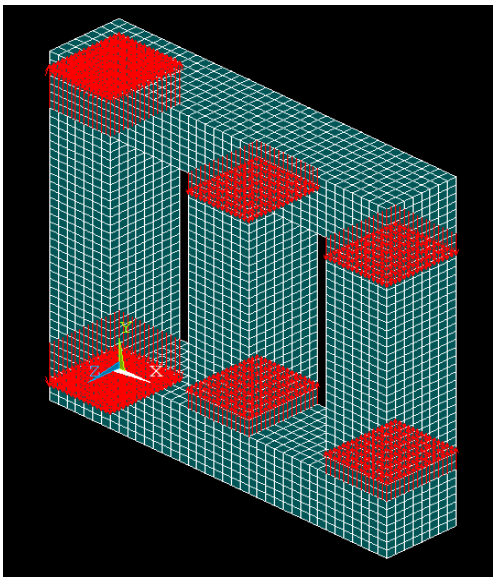
Na skutek zjawiska magnetostrykcji na kolumnę transformatora działają siły zmienne w czasie o wartości:

$$f(t) = \varepsilon(t) \cdot E \cdot A$$

gdzie: A - pole przekroju kolumny , E - moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga), ε(t)- współczynnik magnetostrykcji dla danej częstotliwości.

Siły te zawiera harmoniczne będące wielokrotnością częstotliwości napięcia zasilającego. Powodują one drgania rdzenia, który emituje fale dźwiękowe o identycznych częstotliwościach.

Obliczenia drgań własnych i wymuszonych elementów konstrukcyjnych transformatorów wykonywane są obecnie z wykorzystaniem metody elementów skończonych i pakietów profesjonalnych (Cosmos, ANSYS). Dokładność obliczeń jest uzależniona od stopnia dyskretyzacji modelu rzeczywistego i dokładności przyjętych parametrów mechanicznych do obliczeń



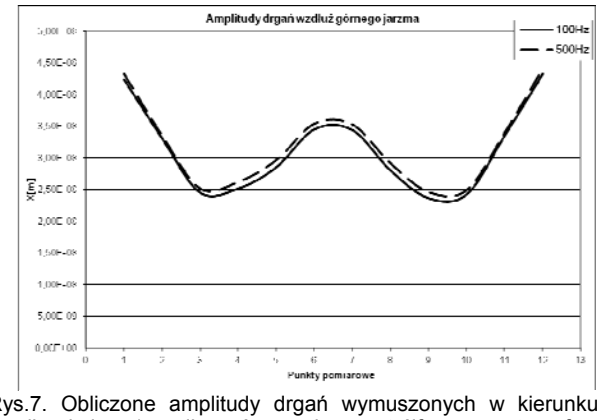
Rys.6 Model rdzenia trójfazowego wykorzystany do obliczeń z równomiernym przyłożeniem sił wymuszających w przekroju kolumn (przesuniętych o 120°).

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy model rdzenia transformatora trójfazowego wykorzystany do obliczeń. Uzwojenia transformatora w stosowanych do obliczeń modelach nie generują sił, ale stanowią dodatkową masę w układzie mechanicznym. Ich wpływ na hałas wypadkowy generowany przez transformator w określonych warunkach

jest istotny i może zostać uwzględniony poprzez odpowiednie współczynniki korekcyjne (szczególnie przy odkształconych prądach w uzwojeniach [7],[8]).

Przy obliczeniach, najczęściej nie uwzględnia się sposobu zaplatania kolumn i jarzm. Można to uwzględnić także za pomocą odpowiednich współczynników korekcyjnych. W obliczeniach przyjmuje się, że na kolumny transformatora działają siły magnetostrykcyjne o częstotliwościach i amplitudach zależnych od indukcji maksymalnej w rdzeniu, przykładane wzdłuż wysokości kolumny w punktach styku kolumn i jarzm. Siły te są najczęściej rozłożone równomiernie na powierzchni jarzm i kolumn (rys. 6). Dla transformatorów trójfazowych siły działające w poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego są przesunięte względem siebie o 120 stopni.

Do obliczania drgań wymuszonych można wykorzystać analizę harmoniczną w zakresie od 50 do 1000 Hz z krokiem co 50Hz, czyli obliczyć amplitudę drgań dla stałej siły wymuszającej i częstotliwości 50, 100, 150…Hz. W ten sposób oblicza się drgania wymuszone dla wszystkich możliwych częstotliwości sił wymuszających. Wykonując obliczenia dla stałej wartości siły wymuszającej w całym zakresie częstotliwości (50 – 1000Hz) uzyskujemy przebieg amplitudy drgań w funkcji częstotliwości dla wybranego miejsca. Rysunek 7 przedstawia obliczone amplitudy drgań wzdłuż górnego jarzma trójfazowego transformatora modelowego dla częstotliwości 100 i 500Hz (punkty 1, 2 znajdują się nad kolumną lewą, punkty 6, 7 nad środkową, a punkty 11, 12 nad prawą). Obliczone charakterystyki dają możliwość obliczania parametrów wibroakustycznych z uwzględnieniem wzmocnień rezonansowych amplitud drgań. Obliczając, wartości sił wymuszających na podstawie warunków zasilania i obciążenia transformatora, możemy przeliczyć amplitudy drgań w danym miejscu rdzenia na podstawie obliczonej amplitudy drgań dla znanej siły wymuszającej i częstotliwości. Można więc raz wykonać model i obliczenia drgań dla projektowanego transformatora i dalej przeliczać uzyskane wyniki na inne warunki jego zasilania i obciążenia.



Rys.7. Obliczone amplitudy drgań wymuszonych w kierunku Y (wzdłuż kolumn) wzdłuż górnego jarzma trójfazowego transformatora modelowego dla częstotliwości od 100 i 500Hz i stałej siły wymuszającej.

Obliczanie hałasu emitowanego przez rdzeń transformatora

Przy obliczaniu przybliżonym natężenia dźwięku emitowanego przez rdzeń transformatora zakładamy, że transformator jest źródłem fali płaskiej i jego natężenie dźwięku można obliczyć z następującej zależności [1]:

$$I_p = 830\pi^2 f^2 X^2$$

gdzie: f -częstotliwość drgań kolumny, X=Δl/2=εl/2 - amplituda drgań wzdłużnych kolumny rdzenia, l- długość kolumny, ε – współczynnik magnetostrykcji dla blachy rdzenia (dla danej indukcji i częstotliwości).

Poziom natężenia dźwięku (w dB), wytwarzanego przez transformator dla danej częstotliwości wyznacza się z zależności [1]:

$$L = 10\log\left(\frac{I_p}{I_o}\right) = 10\log\left(830\cdot\pi^2\cdot f^2\cdot X^2\cdot 10^{12}\right)$$

gdzie: I_0 –natężenie dźwięku odniesienia (W/m2).

Przedstawione obliczenia hałasu transformatora dotyczą poziomu natężenia dźwięku. Uwzględniając charakterystykę korekcji A należy otrzymane wartości zmniejszyć o odpowiednią wartość współczynnika korekcji zależnego od częstotliwości [1],[7].

Powyższa zależność została wyprowadzona, przy założeniu, że transformator jest źródłem fali płaskiej. Im mniejsze są wymiary transformatora, tym mniejsza jest dokładność obliczeń tą metodą, ponieważ wtedy transformator jest źródłem fali kulistej. Należy wtedy uwzględnić tzw. współczynnik kulistości (N_r), określający stosunek natężenia dźwięku wytwarzanego przez drgającą kulę, do natężenia dźwięku emitowanego przez płaszczyznę drgającą z tą samą częstotliwością i amplitudą co kula [1], [7]. Wielkość Nr jest uzależniona od średnicy D kuli opisanej na rdzeniu transformatora i od długości fali dźwiękowej wysyłanej przez tę kulę, czyli częstotliwości drgań rdzenia [1], [7], [8].

Wzór na poziom natężenia dźwięku transformatora przy założeniu, że wysyła on kuliste fale dźwiękowe można przekształcić do następującej postaci:

$$L = 73.1 + 20\lg\frac{f}{100} + 20\lg\varepsilon\cdot 10^6 + 20\lg l + 10\lg N_r$$

Tabela 1. Przykładowe obliczenie wypadkowego, skorygowanego poziomu natężenia dźwięku

f[Hz]	Amplituda drgań X[m]	Natężenie fali płaskiej [W/m2]	Wsp. Kulistości N_r	Natężenie fali kulistej	Poziom natężenia [dB]	Korekcja [dB]	Poziom Po korekcji
100	6,2E-08	3,1E-07	0,23	7,1E-08	48,5	-19,2	29,3
200	1,2E-08	4,4E-08	0,5	2,2E-08	43,5	-10,7	32,8
300	3,0E-08	6,6E-07	0,62	4,1E-07	56,1	-6,9	49,2
400	9,7E-09	1,2E-07	0,8	9,8E-08	49,9	-4,5	45,4
500	1,9E-09	7,7E-09	0,815	6,3E-09	38,0	-3,1	34,9
600	9,3E-10	2,5E-09	0,87	2,2E-09	33,4	-2,1	31,3
700	4,5E-10	7,9E-10	0,9	7,1E-10	28,5	-1,4	27,1
800	4,4E-10	1,0E-09	0,9	9,3E-10	29,7	-0,8	28,9
900	3,0E-10	6,1E-10	0,91	5,5E-10	27,4	-0,3	27,1
1000	1,8E-10	2,6E-10	0,92	2,4E-10	23,8	0	23,8
Poziom wypadkowy [dB]:							**51**

Przedstawiona, przybliżona metoda obliczania hałasu emitowanego przez transformator uwzględnia odkształcenia kolumn transformatora przy danej indukcji [1]. Opierając się na licznych obliczeniach stwierdzono, że najlepszą dokładność obliczeń można uzyskać przyjmując do obliczeń wartość średnią amplitud drgań wszystkich trzech kolumn transformatora dla danych warunków pracy. Znając współczynniki magnetostrykcyjne dla poszczególnych częstotliwości, czyli siły magnetostrykcyjne, należy obliczyć numerycznie amplitudy drgań kolumn rdzenia (z uwzględnieniem wzmocnień rezonansowych)

i ostatecznie poziom natężenie dźwięku emitowanego przez transformator dla tych częstotliwości (uwzględniając kulistość i korekcję A). Otrzymane wartości w dB należy dodać do siebie (wg skali decybelowej), uzyskując wypadkowy poziom natężenia dźwięku w określonym zakresie częstotliwości.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe obliczenie wypadkowego, skorygowanego poziomu natężenia dźwięku na podstawie amplitud drgań dla częstotliwości od 50 do 1000 Hz, dla transformatora modelowego o mocy 30kVA w stanie jałowym, przy napięciu zasilającym 1000V. Wartość hałasu zmierzona w laboratorium dla tego przypadku wynosiła 48 dB. Amplitudy drgań dla poszczególnych częstotliwości z tabeli 1 obliczono jako wartość średnią amplitud drgań trzech kolumn transformatora.

Hałas emitowany przez uzwojenia transformatora

Przy sinusoidalnym obciążeniu transformatora małej mocy, poziom hałasu wywołanego przez drgające uzwojenia jest mały w porównaniu z hałasem spowodowanym drganiami rdzenia. W przypadku transformatorów dużych mocy a w szczególności transformatorów pracujących przy obniżonej wartości indukcji w rdzeniu, hałas emitowany przez uzwojenia może być porównywalny a nawet większy od hałasu rdzenia.
Hałas (skorygowany poziom mocy akustycznej) uzwojeń transformatora energetycznego przy obciążeniu znamionowym można oszacować z następującej przybliżonej zależności [9], [14]:

$$\mathbf{L_u} = 39 + 18\log\left(\mathbf{S_n}/\mathbf{S_o}\right)$$

gdzie: S_n moc znamionowa wyrażona w MVA , S_0 moc obciążeniowa równa 1 MVA .

Jeżeli prąd obciążenia transformatora jest mniejszy lub większy od znamionowego , to do powyższego wyrażenia należy wprowadzić następującą poprawkę:

$$\Delta\mathbf{L_u} = 20 \cdot \log\left(\mathbf{I}/\mathbf{I_n}\right)^2$$

w której: $\mathbf{I}/\mathbf{I_n}$ – stosunek wartości prądu obciążenia do wartości prądu znamionowego.

Dla transformatorów przekształtnikowych, ze względu na odkształcone prądy w uzwojeniach, hałas generowany przez uzwojenia musi być uwzględniony już przy małych mocach.

Dla transformatorów trójfazowych zasilających prostowniki jednokierunkowe, hałas powodowany przez drgające uzwojenia może zwiększać hałas wypadkowy transformatora o 30% przy znamionowym prądzie w uzwojeniach i niskiej indukcji w rdzeniu. Przy dużych indukcjach pracy (rzędu 1,7T) przyrost hałasu transformatora powodowany drganiami uzwojeń zmniejsza się do około 10%. Gdy transformator jest obciążony prądami mniejszymi niż znamionowe, wzrost hałasu jest mniejszy, proporcjonalnie do prądu obciążenia. Dla tego przypadku należy także uwzględnić wzrost hałasu emitowanego przez rdzeń spowodowany jednokierunkowym podmagnesowaniem.

Dla transformatorów trójfazowych zasilających prostownik w układzie mostkowym (6D) przyrost hałasu spowodowany przez drgające uzwojenia wynosi nawet 40% przy niskich indukcjach pracy i 20% dla dużych nasyceń i znamionowych prądów obciążenia. Dla tego układu prostownikowego nie występuje zjawisko podmagnesowania rdzenia składową stałą strumienia.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda uproszczonego obliczania hałasu (na podstawie amplitud drgań kolumn rdzenia dla poszczególnych częstotliwości wymuszających) daje zadowalająca wyniki z punktu widzenia inżynierskiego. Może być stosowana zarówno do obliczeń hałasu transformatorów energetycznych, jak i transformatorów pracujących przy podmagnesowaniu rdzenia składową stałą strumienia lub wiodących prądy odkształcone. W tych przypadkach należy uwzględnić w obliczeniach pojawiające się harmoniczne nieparzyste i istotny wzrost hałasu wypadkowego na skutek hałasu emitowanego przez uzwojenia.

Prezentowany artykuł został opracowany po prezentacji na Konferencji Transformatory Energetyczne i Specjalne w Kazimierzu Dolnym w październiku 2014 roku z uwzględnieniem sugestii uczestników wynikających z dyskusji na sesji plenarnej.

LITERATURA

[1] Jezierski E., Kozłowska A., Narolski B.: Budowa i obliczanie rdzeni transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa 1979.
[2] Majer K.: Wibroakustyka transformatorów, W: Forum ABB, Transformatory Energetyczne, 14-15 listopada 2006, s 227-240.
[3] Majer K., Szulakowski J., Zieliński W.: Badania drgań magnetostrykcyjnych rdzeni transformatorów modelowych, XLIII International Symposium on Electrical Machines, Poznań 2–5.07.2007, s. 65-68.
[4] Majer K.: The analysis of the vibrations of the cores of model transformers, ISEF 2009 - XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Arras, France, September 10-12, 2009, s. 587-588.
[5] Majer K.: Wpływ podmagnesowania rdzenia na zawartość wyższych harmonicznych drgań i hałasu rdzeni transformatorów. Przegląd Elektrotechniczny 6/2011, str. 202-205.
[6] Majer K.: Wpływ obciążenia układem prostownikowym na parametry wibroakustyczne transformatora. Przegląd Elektrotechniczny 4a/2012, str. 38-44.
[7] Majer K.: Hałas uzwojeń transformatorów energetycznych I przekształtnikowych. Wiadomości Elektrotechniczne 2/2013.
[8] Majer K. :Analiza drgań i hałasu transformatorów przekształtnikowych. Zeszyty Naukowe PŁ Nr 1178 Łódź 2013
[9] Reiplinger E.: Study of Noise Emitted by Power Transformers Based on Today's Viewpoint, (materiały konferencyjne) CIGRE, Paris 1988.
[10] Witczak P. : Powstawanie i przenoszenie drgań w transformatorach energetycznych, V Forum Transformatory Energetyczne, 2010, ABB , pp.99-124.
[11] Witczak P.: Obliczenia akustyczne transformatora, VI Forum Transformatory Energetyczne, 2011, ABB , pp.187-198.
[12] Technical Data on Domain Refined ORIENTCORE HI-B ZDKH, Nippon Steel Corporation 1986.
[13] Lamierino A Grano Orientato, TERNI ACCIAIO PER L'ENERGIA 1981.
[14] PN-EN 60076-10:2003 Transformatory. Część 10: Wyznaczanie poziomów dźwięku. Power transformers. Part 10. Determination of sound levels.

***Autor**: Dr inż. Krzysztof Majer, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. B. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź,*
E-mail: krzysztof.majer@p.lodz.pl.