

doi:10.15199/48.2017.07.02

Magnesowanie rdzeni transformatorów przy podmagnesowaniu składową stałą strumienia.

Streszczenie. Artykuł prezentuje wpływ podmagnesowania rdzenia transformatora składową stałą strumienia na indukcję maksymalną w poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego oraz kształt i wartości prądów magnesujących. Przedstawiono układy pomiarowe do analizy podmagnesowania transformatorów jednofazowych oraz trójfazowych przy jednoczesnym podmagnesowywaniu wszystkich kolumn rdzenia i każdej z kolumn z osobna. Przedstawiona została analiza zmian parametrów transformatora pracującego w różnych stanach podmagnesowania.

Abstract. The paper presents the influence of unidirectional (constant) sub magnetization of the ferromagnetic core of a transformer on the maximum flux density in particular segments of the magnetic circuit and the shape and values of the magnetizing currents. Measurement circuits have been presented, used for the analysis of the sub magnetization of single phase and three phase transformers. It is possible to sub magnetize each column separately or all columns at once. The analysis of the fluctuation of transformer parameters operating in different states of sub magnetization has been presented. **The influence of unidirectional (constant) sub magnetization of the ferromagnetic core of a transformer**

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, podmagnesowanie, prąd magnesujący.

Keywords: power transformer, submagnetizing, magnetizing current.

Wstęp

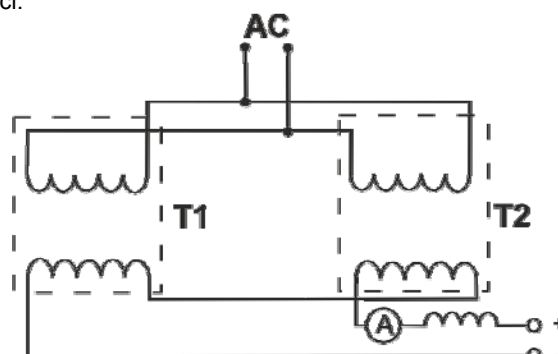
Prąd jałowy transformatora płynący po stronie zasilania zależy od kształtu charakterystyki magnesowania (przy pominięciu pętli histerezy) i maksymalnej indukcji pracy. Może on zostać wyznaczony z przebiegu wartości chwilowej napięcia zasilającego i kształtu charakterystyki magnesowania. Zawiera on nieparzyste harmoniczne, zależne od stopnia nasycenia rdzenia.

W przypadku, gdy rdzeń transformatora jest podmagnesowany składową stałą strumienia (na skutek występowania składowej stałej prądu w uzwojeniu wtórnym transformatora, która nie jest transformowana na stronę pierwotną), kształt prądu pobieranego przez transformator ulega odkształceniu i staje się asymetryczny. Wypadkowa indukcja maksymalna (od składowej stałej prądu i sinusoidalnego napięcia zasilającego) może osiągać wartości zbliżone do indukcji nasycenia. Występuje wzajemne oddziaływanie na siebie obu składowych wynikające z charakterystyki magnesowania [1], [2]. W zależności od reluktancji drogi magnetycznej dla strumienia podmagnesowującego, wpływa on w różny sposób na nasycenie obwodu magnetycznego. Jest to uzależnione dodatkowo w transformatorach trójfazowych od konstrukcji rdzenia (trójfazowy trójkolumnowy lub pięciokolumnowy). W wybranych stanach pracy transformatorów trójfazowych, poszczególne odcinki obwodu magnetycznego mogą być dodatkowo podmagnesowywane w różnym stopniu.

Podmagnesowanie rdzeni transformatorów jednofazowych

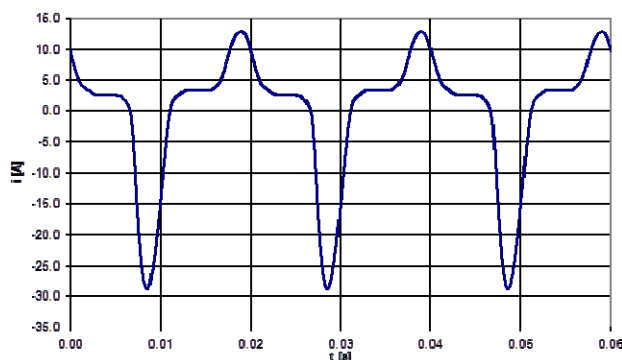
Do zbadania wpływu podmagnesowania rdzenia transformatorów jednofazowych na ich parametry magnetyczne zostały wykorzystane dwa identyczne transformatory jednofazowe, dwukolumnowe posiadające po dwa uzwojenia każdy (T1, T2, rys.1). Pierwotne uzwojenia każdego rdzenia są połączone szeregowo i zasilane napięciem przemiennym. Uzyskujemy w ten sposób wzbudzenie rdzenia i regulację składowej przemienną indukcji. Pozostałe dwa uzwojenia są połączone przeciwnie, czyli wartość skuteczna napięcia wypadkowego tych uzwojeń jest równa zero. Są one wykorzystywane do podmagnesowania badanych rdzeni składową stałą strumienia, czyli zasilane prądem stałym. Nawinięte na rdzeniach transformatorów sondy pomiarowe pozwalają na określenie składowej przemienną indukcji.

Określenie wypadkowej indukcji maksymalnej w rdzeniu transformatora przy podmagnesowaniu jest możliwe poprzez określenie wartości szczytowej prądu pobieranego z sieci.



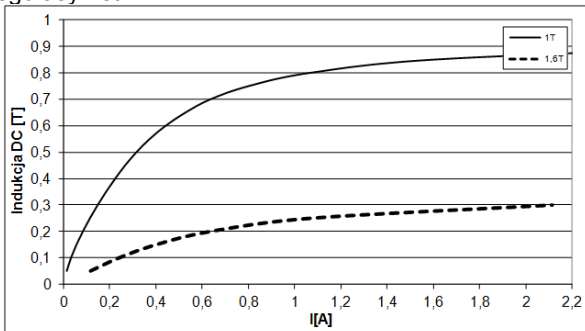
Rys.1. Schemat układu pomiarowego do badania podmagnesowania transformatorów jednofazowych.

Zmieniając parametry składowej stałej i przemienną indukcji w układzie z rys 1 uzyskujemy różne przebiegi prądu magnesującego. Dla rdzenia transformatora jednofazowego strumień podmagnesowujący zamyka się drogą o małej reluktancji i już przy małym prądzie składowej stałej, odpowiadający mu strumień podmagnesowujący przyjmuje duże wartości. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg wartości chwilowej prądu magnesującego transformatora jednofazowego przy podmagnesowaniu rdzenia składową stałą strumienia.



Rys.2. Przebieg prądu uzwojenia zasilającego (AC) transformatora przy podmagnesowaniu rdzenia składową stałą strumienia.

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany wartości składowej stałej indukcji w rdzeniu w funkcji prądu podmagnesowującego dla indukcji składowej przemiennej równej 1 i 1,6T. Dla indukcji składowej przemiennej równej 1T wzrost prądu podmagnesowującego do 2,1A powoduje wzrost indukcji składowej stałej o około 0,87T, a dla 1,6T o 0,3T. Im wyższa indukcja składowej przemiennej, tym mniejszy wzrost indukcji składowej stałej przy danym prądzie podmagnesowującym, przy jednoczesnym szybkim wzroście przemiennej prądu magnesującego (nasycenia) i jego asymetrii.



Rys.3. Wartość indukcji składowej stałej w rdzeniu transformatora jednofazowego w funkcji prądu podmagnesowującego dla indukcji składowej przemiennej równej 1 i 1,6T.

Podmagnesowanie rdzeni transformatorów trójfazowych.

W transformatorach trójfazowych podmagnesowanie może występować jako jarzmowe (o dużej reluktancji), lub drogą o małej reluktancji. W pierwszym przypadku stały prąd podmagnesowujący wymusza stosunkowo niewielki strumień składowej stałej. W drugim przypadku, podobnie jak w transformatorze jednofazowym, niewielka składowa stała prądu, wymusza duży strumień podmagnesowujący.

Badania eksperymentalne wykonano dla transformatorów trójfazowych o mocy 30kVA i przekładni 1000/420V (rys.4). Transformatory badane zostały zaprojektowane i wyprodukowane jako wielouzwojeniowe. Posiadały dwa uzwojenia wtórne, dające możliwość uzyskania różnych układów połączeń.



Rys.4. Widok transformatora badanego

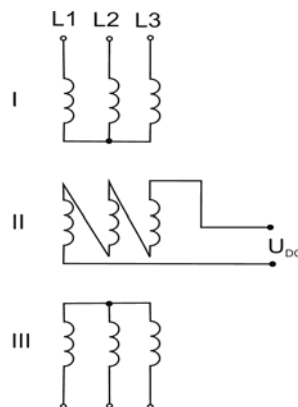
Podmagnesowanie transformatora trójfazowego trójkolumnowego strumieniem jarzmowym.

Praca niektórych układów przekształtnikowych powoduje występowanie w rdzeniu transformatora trójfazowego strumienia jednakofazowego, mającego identyczne cechy jak strumień kolejności zerowej przy obciążeniu niesymetrycznym. Dla rdzenia trójkolumnowego transformatora trójfazowego, przy braku magnetycznej drogi powrotnej dla strumienia kolejności zerowej, zamyka się on jako strumień jarzmowy. Dla transformatorów o rdzeniu pięciokolumnowym, strumień kolejności zerowej zamyka się przez skrajne kolumny powrotne. W tym przypadku, ze względu na małą reluktancję dla strumienia składowej zerowej, już przy małym prądzie tej składowej,

odpowiadający mu strumień zerowy przyjmuje duże wartości, podobnie jak w transformatorach jednofazowych.

Impedancję dla składowej zerowej można wyznaczyć najłatwiej pomiarowo, przykładając do równoległe połączonych uzwojeń wtórnych transformatora napięcie jednofazowe.

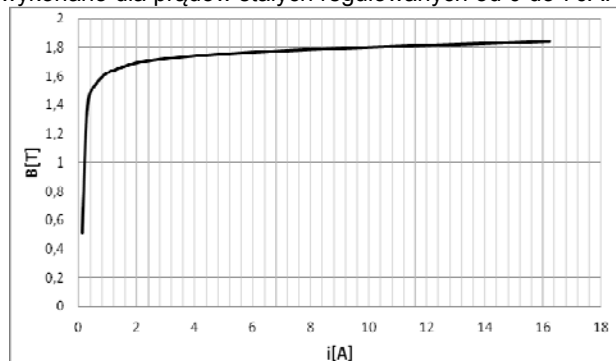
W układzie Yyn impedancja transformatora trójfazowego trójkolumnowego wynosi między 50 a 70%. Impedancja ta jest w tym przypadku w przybliżeniu około 10 razy większa od impedancji dla kolejności zgodnej i przeciwnej. Transformatory smukłe i wysokie mają mniejszą wartość impedancji dla składowej zerowej, a niższe większą [1], [2]. Umieszczenie transformatora w ekranowanej kadzi zwiększa wartość impedancji składowej zerowej.



Rys.5. Układ połączeń trójfazowego transformatora trójfazowego do badań przy podmagnesowaniu rdzenia strumieniem jarzmowym.

Na rysunku 5 przedstawiono układ pomiarowy do badania transformatora trójfazowego, trójkolumnowego przy podmagnesowaniu strumieniem jarzmowym. Jedno z uzwojeń (II) transformatora połączono w otwarty trójkąt i zasilono prądem stałym uzyskując różny stopień podmagnesowania. Uzwojenie pierwotne (I) zasilano regulowanym napięciem przemiennym uzyskując różne wartości składowej przemiennej strumienia.

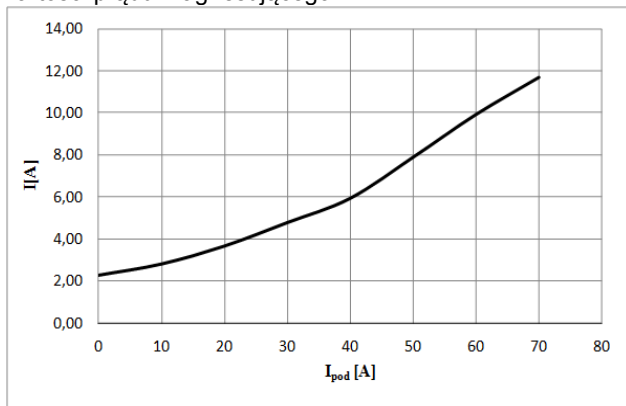
W prezentowanym układzie pomiarowym wykonano pomiary wartości chwilowych prądów, napięć i indukcji w poszczególnych fazach transformatora. Pomiary wykonane bez podmagnesowania w zakresie indukcji maksymalnych od 0,5 do 1,85T pozwoliły na wykreślenie charakterystyki indukcji maksymalnej w funkcji wartości szczytowej prądu magnesującego (rys.6). Charakterystyka ta pozwala na określenie wypadkowej indukcji maksymalnej w rdzeniu przy podmagnesowaniu. Pomiary przy podmagnesowaniu wykonano dla prądów stałych regulowanych od 0 do 70A.



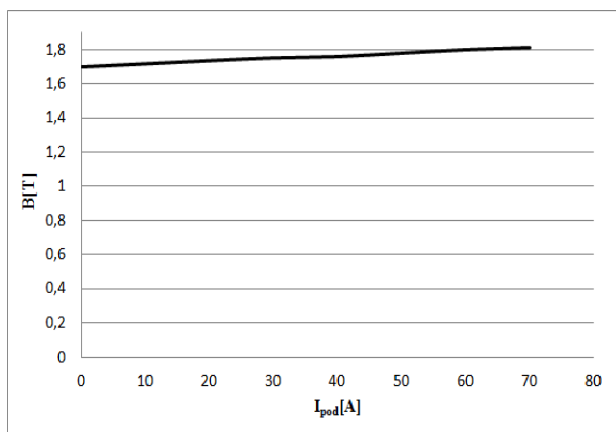
Rys.6. Pomierzona charakterystyka wartości maksymalnej indukcji w kolumnie w funkcji wartości szczytowej prądu w uzwojeniu zasilanym bez podmagnesowania.

Rysunek 7 prezentuje zmianę wartości szczytowej prądu magnesującego a rysunek 8 indukcji maksymalnej w funkcji prądu podmagnesowującego (dla indukcji składowej

przemiennej równej 1,7T). Zmiana prądu podmagnesowującego od 0 do 70A powoduje przyrost wypadkowej indukcji maksymalnej o około 7% i pięciokrotny przyrost wartości szczytowej prądu magnesującego. Dla mniejszych wartości indukcji składowej przemiennej przyrost indukcji maksymalnej jest podobny, przy mniejszym wzroście wartości prądu magnesującego.



Rys.7. Zmiana wartości szczytowej prądu magnesującego w funkcji prądu podmagnesowującego (dla indukcji składowej przemiennej równej 1,7T).

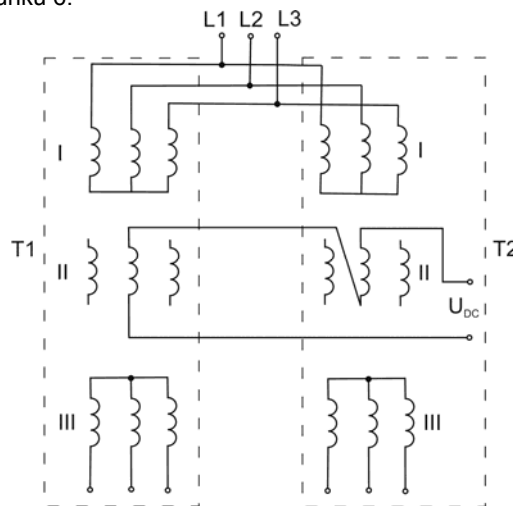


Rys.8. Zmiana indukcji maksymalnej w funkcji prądu podmagnesowującego (dla indukcji składowej przemiennej równej 1,7T).

Podmagnesowanie jednej z kolumn transformatora trójfazowego, trójkolumnowego.

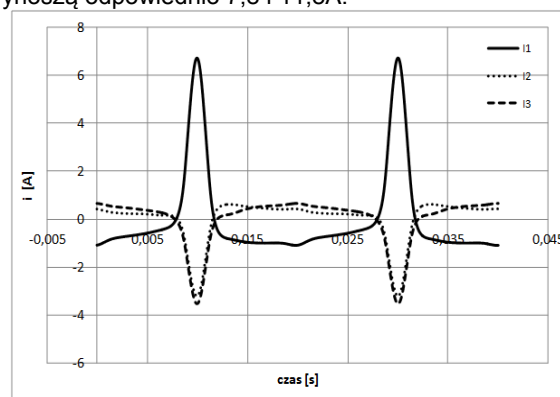
W wybranych stanach pracy układów przekształtnikowych występuje podmagnesowywanie jednej z kolumn transformatora zasilającego lub poszczególne kolumny są podmagnesowywane w różnym stopniu [6], [7]. W celu zbadania wpływu tego podmagnesowania na przebiegi prądów i indukcji maksymalnych w poszczególnych kolumnach transformatora wykonano badania w układzie pomiarowym, jak na rysunku 9. Do badań wykorzystano dwa identyczne transformatory (rys.4), łącząc jedno z wtórnych uzwojeń przeciwnie i zasilając prądem stałym. W tym przypadku, zarówno podczas podmagnesowywania jednej z kolumn skrajnych, jak i kolumny środkowej, strumień płynie drogą o małej reluktancji. Z tego powodu już prądy podmagnesowujące o małej wartości powodują, że powstający strumień przyjmuje znaczne wartości. Tak jak w przypadku badania transformatorów jednofazowych, nawinięte na poszczególne kolumny sondy pomiarowe pozwalały na określenie składowej przemiennej indukcji, natomiast wartość indukcji maksymalnej w poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego określano na podstawie wartości

szczytowej prądu danej fazy i wyznaczonej charakterystyki z rysunku 6.



Rys.9. Układ połączeń do badań przy podmagnesowaniu jednej z kolumn transformatora.

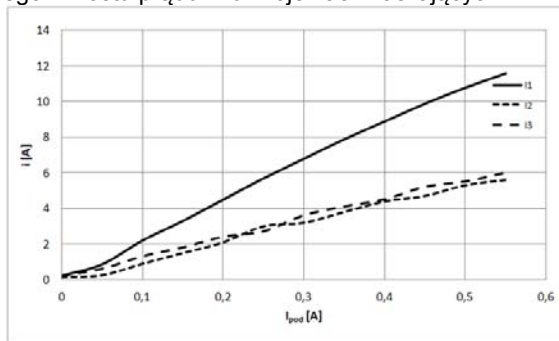
Na rysunku 10 przedstawiono prądy fazowe transformatora badanego przy podmagnesowaniu kolumny skrajnej prądem stałym o wartości 0,3A i składowej przemiennej indukcji (napięcie zasilające) równej 1T. Ze względu na małą reluktancję dla strumienia podmagnesowującego, już przy prądzie stałym równym 0,3A, podmagnesowanie jest tak silne, że fazowe prądy magnesujące osiągają bardzo duże wartości, szczególnie w kolumnie podmagnesowywanej. Na rysunku 11 przedstawiono wartości szczytowe prądów fazowych transformatora przy podmagnesowaniu kolumny skrajnej w funkcji prądu podmagnesowującego dla indukcji składowej przemiennej równej 1,0T. Przy braku podmagnesowania prądy fazowe wynosiły około 0,22A, natomiast dla prądów podmagnesowujących 0,3 i 0,5A wzrastają odpowiednio do 6,7 i 10,8A (dla kolumny podmagnesowywanej). Przy indukcji składowej przemiennej równej 1,6T wzrosty dla w/w prądów podmagnesowujących są jeszcze większe i wynoszą odpowiednio 7,8 i 11,8A.



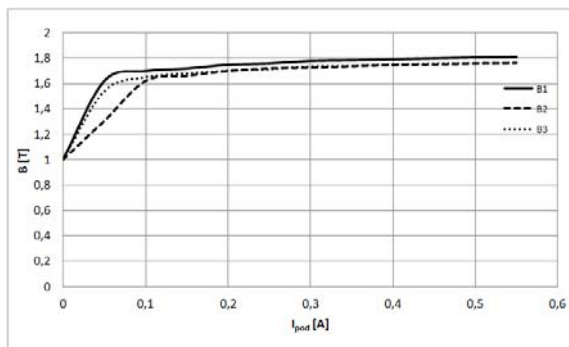
Rys.10. Prądy fazowe uzwojeń transformatora przy podmagnesowaniu kolumny skrajnej prądem 0,3A i indukcji składowej przemiennej 1T (I1- prąd skrajnej kolumny podmagnesowywanej).

Na rysunku 12 przedstawiono przyrost indukcji maksymalnej w poszczególnych kolumnach rdzenia w funkcji prądu podmagnesowującego kolumny skrajnej dla indukcji składowej przemiennej równej 1T, a na rysunku 13 dla 1,6T. Przyrost ten jest tak duży, że niezależnie od indukcji składowej przemiennej wynikającej z napięcia zasilającego, indukcja w poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego przekracza 1,75T i zbliża się do

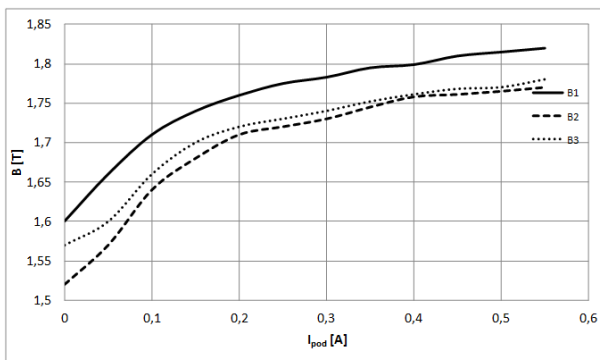
indukcji nasycenia. Praca transformatora przy tego typu podmagnesowaniu jest więc możliwa przy niewielkich prądach podmagnesowujących, które nie powodują zbyt dużego wzrostu prądu w uzwojeniach zasilających.



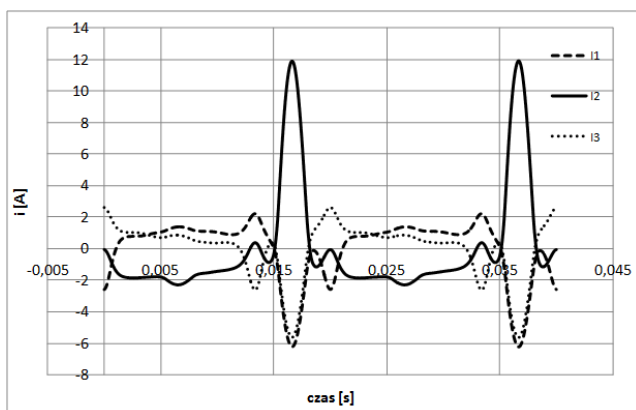
Rys.11. Wartości szczytowe prądów fazowych transformatora przy podmagnesowaniu kolumny skrajnej prądem stałym (oś pozioma) dla indukcji składowej przemiennej 1,0T.



Rys.12. Przyrost indukcji maksymalnej w poszczególnych kolumnach rdzenia w funkcji prądu podmagnesowującego kolumny skrajnej dla indukcji składowej przemiennej równej 1T.



Rys.13. Przyrost indukcji maksymalnej w poszczególnych kolumnach rdzenia w funkcji prądu podmagnesowującego kolumny skrajnej dla indukcji składowej przemiennej równej 1,6T.



Rys.14. Prądy fazowe uzwojeń transformatora przy podmagnesowaniu kolumny środkowej prądem 0,6A i indukcji składowej przemiennej 1,6T (I2- prąd kolumny środkowej).

Prezentowane powyżej zjawisko przebiega podobnie przy podmagnesowywaniu kolumny środkowej, w której występuje wtedy maksymalny prąd magnesujący i maksymalna indukcja wypadkowa (rys.14).

Tak silne podmagnesowania rdzenia objawia się także gwałtownym wzrostem strat w rdzeniu i hałasu emitowanego przez transformator [4], [5].

Ten rodzaj podmagnesowania będzie występował także w przypadku transformatorów pięciokolumnowych w których strumień jarzmowy będzie się zamykał przez kolumny skrajne.

Podsumowanie

W transformatorach specjalnych występuje bardzo często składowa stała prądu obciążenia. Składowa ta nie transformuje się na stronę pierwotną, podmagnesowując rdzeń składową jednokierunkową strumienia, zwiększając wartość prądu magnesującego i pogarszając jego właściwości magnetyczne. Składowa ta może zamykać się w rdzeniu transformatora lub jako tzw. strumień jarzmowy.

Podmagnesowanie strumieniem jarzmowym powoduje wzrost indukcji maksymalnej w rdzeniu maksymalnie o kilkanaście procent i może zostać uwzględniona już na etapie projektowania transformatora.

Składowa podmagnesowująca zamykająca się przez obwód magnetyczny transformatora wpływa zdecydowanie bardziej niekorzystnie na jego pracę. Może ona w niektórych przypadkach wręcz uniemożliwiać jego dalszą pracę. Ten typ podmagnesowania występuje najczęściej w awaryjnych stanach pracy transformatorów specjalnych i powoduje ich awaryjne wyłączenie. Zjawisko to może być bardziej niekorzystne dla transformatorów jednofazowych i trójfazowych pięciokolumnowych.

Podmagnesowanie rdzenia składową stałą strumienia pogarsza również właściwości wibroakustyczne rdzenia, generując dodatkowe harmoniczne drgań i powodując bardzo istotny wzrost hałasu całego transformatora.

Artykuł jest po-konferencyjną wersją referatu zaprezentowanego na XI Konferencji Naukowo-Technicznej Transformatory Energetyczne i Specjalne, która odbyła się w Kazimierzu Dolnym w dniach 5-7.10.2016r. organizowanej przez ZREW Transformatory S.A., Politechnikę Łódzką i Instytut Energetyki.

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

LITERATURA

- [1] Jabłoński M.: Transformatory. Wydanie 3, Politechnika Łódzka, Łódź 1978.
- [2] Jabłoński M.: Przekształtniki (Static converters), Łódź 1978.
- [3] Eugeniusz Jezierski: Transformatory. Podstawy teoretyczne. WNT Warszawa
- [4] Krzysztof Majer: Wpływ podmagnesowania rdzenia na zawartość wyższych harmonicznych drgań i hałasu rdzeni transformatorów. Przegląd Elektrotechniczny 6/2011, str. 202-205.
- [5] Krzysztof Majer: Wpływ obciążenia układem prostownikowym na parametry wibroakustyczne transformatora. Przegląd Elektrotechniczny 4a/2012, str. 38-44.
- [6] Krzysztof Majer: Vibrations of transformer cores operating with submagnetizing of DC flux. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, pp173-182, 2016
- [7] Napieralska – Juszcak E.: Simulation of failures in convertor transformers. Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe Nr 603, 1991.