

Jacek HORISZNY\*

## UKŁAD DO DEMAGNETYZACJI RDZENIA TRANSFORMATORA ENERGETYCZNEGO

W pracy przedstawiono dwie koncepcje układu do demagnetyzacji rdzenia transformatora, którego zadaniem jest sprowadzenie strumieni szczątkowych do wartości jak najbliższych zera. Układy opracowano przy założeniu, że do rozmagnesowania są wykorzystywane uzwojenia transformatora, a prąd rozmagnesowujący powstaje na skutek swobodnych oscylacji w obwodzie LC. Funkcjonowanie układów przeanalizowano metodą symulacji komputerowych. Przedyskutowano zagadnienie doboru parametrów poszczególnych układów. Przedstawiono także wyniki badań laboratoryjnych, które wykazały, że zaproponowane układy dokonują skuteczniej demagnetyzacji rdzenia.

SŁOWA KLUCZOWE: transformator energetyczny, magnetyzm szczątkowy, prąd włączania, demagnetyzacja

### 1. WPROWADZENIE

Stan namagnesowania rdzenia transformatora energetycznego ma istotny wpływ na przebiegi i wartości jego prądów załączenia w stanie jałowym. Magnetyzm szczątkowy o znacznej wartości wyraźnie zwiększa wartości szczytowe tych prądów. Stąd zmniejszenie szczątkowego namagnesowania rdzenia, czyli jego demagnetyzacja, może ograniczyć wartości prądów załączania. Zmniejszenie magnetyzmu szczątkowego do z góry określonego poziomu pozwala dobrać właściwy sposób sterowania zamykaniem biegunów wyłącznika, pozwalający na ograniczenie wartości prądu załączeniowego. Ma to istotne znaczenie, gdy wykorzystuje się metodę załączania synchronizowanego (*ang.* controlled switching) [1]. Celem demagnetyzacji w tym przypadku jest sprowadzenie strumieni szczątkowych do wartości jak najbliższych zera. Rozmagnesowanie rdzenia ferromagnetycznego można osiągnąć poprzez wzbudzenie w nim przemiennego pola magnetycznego o malejącej amplitudzie [3]. Punkt pracy na charakterystyce namagnesowania obwodu magnetycznego przemieszcza się wówczas po wewnętrznych, w stosunku do głównej, pętłach histerezy o coraz mniejszej rozpiętości [2, 4]. W ten sposób strumienie szczątkowe w kolumnach rdzenia mogą być sprowadzone do bardzo małej, bliskiej zera, wartości. Biorąc pod uwagę możliwość

---

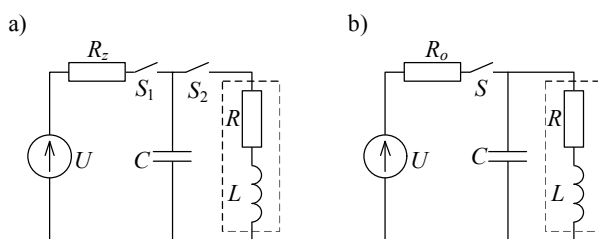
\* Politechnika Gdańska.

praktycznego wykorzystania tej metody, przyjęto, że jej realizacja powinna spełnić następujące założenia:

- układ do demagnetyzacji będzie możliwie prosty,
- do przemagnesowywania rdzenia zostaną wykorzystane uzwojenia robocze transformatora,
- sposób wykorzystania uzwojeń transformatora nie będzie wymagał zmiany ich połączeń,
- przemienne pole magnetyczne w rdzeniu zostanie wytworzone przez prąd oscylujący w obwodzie rzeczywistym LC.

## 2. STRUKTURA UKŁADU DEMAGNETYZACYJNEGO

W celu sprowadzenia stanu namagnesowania rdzenia do zera układ demagnetyzacyjny wytwarza w nim przemienne strumienie o zmniejszającej się do zera amplitudzie. Strumienie te są wytwarzane przez prądy w uzwojeniu transformatora o takim samym charakterze zmienności. Przebieg oscylacyjny prądu można uzyskać w sposób naturalny w obwodzie LC. Oscylacje maleją w nim wskutek rozpraszania energii w rezystancji. Podczas tego procesu uzwojenie trójfazowe transformatora jest zasilane jednofazowo. Istnieje możliwość wykorzystania do tego celu uzwojeń jednej, dwóch lub trzech kolumn przez odpowiednie połączenie ich dostępnych końców. W obwodzie rozmagnesowującym rdzeń transformatora jest wykorzystywana indukcyjność  $L$ , która jest indukcyjnością uzwojenia jednej fazy bądź wypadkową indukcyjnością uzwojeń 2 lub 3 faz transformatora.



Rys. 1. Układy do demagnetyzacji rdzenia magnetycznego

Utworzenie obwodu drgającego wymaga dodania kondensatora o pojemności  $C$  oraz układu, który dostarczy do obwodu drgającego energię w ilości wystarczającej do kilkakrotnego przemagnesowania rdzenia w taki sposób, aby po zaniknięciu drgań rdzeń nie wykazywał trwałego namagnesowania. Przed zamknięciem obwodu drgającego dostarczona energia zostaje zgromadzona w układzie – w pojemności  $C$ , w indukcyjności  $L$  lub w obu tych elementach

jednocześnie. Na tej podstawie można zaproponować następujące układy demagnetyzacyjne:

- układ demagnetyzacyjny I, w którym pobrana ze źródła energia do demagnetyzacji zostaje zgromadzona w pojemności  $C$ , przedstawiony na rys. 1a,
- układ demagnetyzacyjny II, w którym pobrana ze źródła energia do demagnetyzacji zostaje zgromadzona w indukcyjności  $L$ , przedstawiony na rys. 1b.

### 2.1. Układ demagnetyzacyjny I

W układzie z rys. 1a, przed rozpoczęciem demagnetyzacji, kondensator  $C$  zostaje naładowany ze źródła napięcia  $U$  gdy łącznik  $S_1$  jest zamknięty a  $S_2$  otwarty. Po osiągnięciu ustalonej wartości napięcia na pojemności  $C$  następuje otwarcie łącznika  $S_1$ , zamknięcie  $S_2$  powoduje przyłączenie kondensatora do uzwojenia i zapoczątkowanie oscylacyjnego przepływu prądu w obwodzie demagnetyzacyjnym. Rezystancja  $R_z$  ogranicza prąd ładowania kondensatora.

### 2.2. Układ demagnetyzacyjny II

W drugim układzie (rys. 1b) gromadzenie energii w indukcyjności  $L$  odbywa się przy zamkniętym łączniku  $S$ . Gdy prąd w uzwojeniu osiągnie wartość ustaloną, która stanowi wartość początkową prądu rozmagnesowującego, otwarcie łącznika umożliwi przepływ prądu uzwojenia przez kondensator, co zapoczątkowuje proces demagnetyzacji. Wartość energii zgromadzonej w pojemności  $C$  podczas jej gromadzenia w układzie nie jest znacząca dla procesu demagnetyzacji, gdyż napięcie na pojemności, równe w przybliżeniu spadkowi napięcia na rezystancji uzwojenia  $R$ , nie osiąga dużej wartości. Wynika to z małej wartości rezystancji uzwojenia. Rezystancja  $R_o$  w tym układzie ogranicza wartość prądu przy ładowaniu. W porównaniu z poprzednim, w układzie demagnetyzacyjnym II mogą występować mniejsze problemy konstrukcyjne. Źródło  $U$  nie musi dostarczać napięcia o znacznej wartości, gdyż wymagana w procesie gromadzenia energii wartość prądu ma wartość porównywalną z prądem jałowym transformatora. Z racji występowania tylko jednego łącznika sterowanie jest znacznie prostsze w porównaniu z układem I.

## 3. PARAMETRY UKŁADU DEMAGNETYZACYJNEGO

Zasadniczymi parametrami układu demagnetyzacyjnego są:

- wypadkowa indukcyjność obwodu  $L$ , wynikająca ze sposobu wykorzystania uzwojeń umieszczonych na kolumnach rdzenia,
- pojemność  $C$ ,
- wartość początkowa prądu rozmagnesowującego  $i_p$ ,

– wartość początkowa napięcia na pojemności  $U_C$ .

Częstotliwość drgań własnych liniowego idealnego obwodu LC jest określona zależnością:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Jednak indukcyjność obwodu demagnetyzacyjnego jest nieliniowa. Dla dużych wartości prądów maleje wraz ze zwiększaniem się wartości prądu. Aby demagnetyzacja była skuteczna, wytworzone w rozmagnesowywanym rdzeniu oscylujące pole magnetyczne powinno być dwukierunkowe. Oznacza to, że rozmagnesowanie musi rozpocząć się dla punktu pracy obwodu magnetycznego położonego na głównej pętli histerezy magnetycznej. Aby w sposób pewny umieścić punkt pracy na głównej pętli histerezy należy go przesunąć na charakterystyce magnesowania poza punkt nasycenia. Na tej podstawie, przy pomocy charakterystyki  $\Psi(i)$  można określić minimalną, wymaganą do skutecznej demagnetyzacji, wartość początkową prądu rozmagnesowującego  $i_p$  jest to wartość prądu w punkcie nasycenia obwodu magnetycznego. Znajomość wartości  $i_p$  pozwala na określenie z charakterystyki  $L(i)$  minimalnej indukcyjności obwodu  $L_p$ .

Z uwagi na to, że rdzeń transformatora energetycznego podczas normalnej pracy jest magnesowany przez prąd o częstotliwości sieciowej tj. 50 Hz, przy określaniu parametrów obwodu demagnetyzującego można przyjąć taką częstotliwość drgań własnych tego układu jako górną wartość graniczną [3]. Znając wartość  $L_p$  można ze wzoru (1) określić minimalną pojemność  $C$ , dla której częstotliwość  $f$  nie przekroczy wartości 50 Hz:

$$C > \frac{10^{-4}}{\pi^2 L_p} \quad (2)$$

Warunek wystąpienia oscylacji w rozpatrywanym rzeczywistym układzie LC można przedstawić w następującej postaci:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

gdzie  $R$  oznacza całkowitą rezystancję obwodu, której dominującą część stanowi rezystancja uzwojenia. Przekształcając nierówność (3) dla indukcyjności  $L = L_p$  otrzymuje się drugi warunek dla pojemności  $C$ :

$$C < 4 \frac{L_p}{R^2} \quad (4)$$

Aby warunki (2) i (4) tworzyły niezerowy przedział wartości, musi być spełniona relacja:



$$\frac{10^{-4}}{\pi^2 L_p} < 4 \frac{L_p}{R^2} \quad (5)$$

którą można przekształcić do postaci:

$$\frac{L_p}{R} > \sqrt{\frac{10^{-4}}{4\pi^2}} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (6)$$

W tabeli 1 zamieszczono niektóre dane znamionowe i wynikające z nich parametry wybranych transformatorów. Należy zwrócić uwagę na parametr  $t_p$ , za pomocą którego można oszacować wartość stosunku  $L_p/R$  w zależności (6), i który obliczono z równania:

$$t_p = \frac{0,05L_\mu}{R_1} \quad (7)$$

gdzie:  $L_\mu$  – indukcyjność magnesująca transformatora,  $R_1$  – rezystancja uzwojenia transformatora,  $t_p$  – stała czasowa układu..

Tabela 1. Dane i parametry wybranych transformatorów

Konstrukcja		Olejowy	Żywiczny	Olejowy	Żywiczny	Olejowy	Żywiczny
Producent		IMEFY	EdM	TMG	EdM	TMG	EdM
$S$	kVA	25	100	250	400	1000	2000
$U_{In}$	kV	15,75	15	15,75	15	15,75	15
$I_0$	%	4	2	1	1,3	0,5	0,6
$\Delta P_{Fe}$	W	115	430	580	1250	1400	3350
$L_\mu$	H	893	456	411	181	219	83
$R_l$	$\Omega$	139,0	18,8	7,34	3,52	1,34	0,47
$t_p$	s	0,32	1,21	2,80	2,58	8,19	8,85

Występujący w zależności (7) współczynnik liczbowy określono na podstawie kształtu typowej charakterystyki  $L(i)$ , na której  $L_p$  stanowi 5÷10 % wartości indukcyjności maksymalnej, przyjęto:  $L_p = 0,05L_\mu$ . Na podstawie obliczonych wartości  $t_p$  można stwierdzić, że spełnienie warunku (6), a w konsekwencji uzyskanie przebiegów oscylacyjnych prądu w obwodzie demagnesującym, nie stanowi problemu w transformatorze o mocy powyżej 100 kVA dla pojemności  $C$  spełniającej warunki (2) i (4).

W układzie demagnetyzacyjnym I należy określić napięcie, do którego zostanie naładowany kondensator. Przekształcając wzór określający energię  $E$  zawartą w pojemności  $C$  naładowanej do napięcia o wartości  $U_C$ :



$$E = \frac{CU_C^2}{2} \quad (8)$$

można wyznaczyć napięcie  $U_C$ :

$$U_C = \sqrt{\frac{2E}{C}} \quad (9)$$

Występująca we wzorze (9) energia  $E$ , niezbędna do demagnetyzacji rdzenia, może być porównana z energią, jaką gromadzi indukcyjność  $L$  układu demagnetyzacyjnego II przed rozpoczęciem rozmagnesowania, gdy prąd przez nią płynący przyjmuje wartość początkową  $i_p$ . Określenie ilości tej energii jest utrudnione, gdyż strumień magnetyczny wytworzony przez prąd w uzwojeniu prawie w całości zamyka się w środowisku ferromagnetycznym. Z tego powodu tylko część dostarczonej do uzwojenia energii zostaje zmagazynowana w wytworzonym polu magnetycznym. Reszta jest zużywana na przemagnesowanie rdzenia. Należy podkreślić, że omawiane tutaj procesy dotyczą etapu gromadzenia energii w układzie, a nie samej demagnetyzacji. Na tym etapie rozważań trzeba stwierdzić, że określenie wartości  $E$  jest najdogodniejszą metodą doświadczalną.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

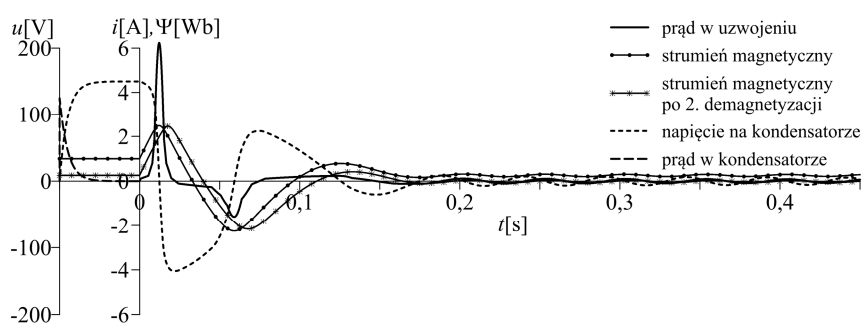
Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w programie ATP/EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Zbadano oba układy demagnetyzacyjne. Wyniki w postaci wykresów obliczonych przebiegów przedstawiono na rys. 2 i rys. 3. Symulacja, oprócz samej demagnetyzacji obejmowała także proces gromadzenia energii. Rozpoczęcie demagnetyzacji następowało dla czasu  $t = 0$ .

Wyniki uzyskane w układzie demagnetyzacyjnym I przedstawiono na rys. 2. Demagnetyzacja zostaje rozpoczęta po ustaleniu się wartości prądu i napięcia w pojemności. Po otwarciu łącznika  $S_1$  i zamknięciu łącznika  $S_2$  przez uzwojenie płynie oscylacyjny prąd, odkształcony na skutek nieliniowości obwodu magnetycznego. Powoduje on przemagnesowanie rdzenia magnetycznego w obu kierunkach. Powstały na skutek przepływu prądu strumień magnetyczny również ma charakter oscylacyjny. Oscylacje obu przebiegów z czasem zanikają do zera. Jest istotne to, że oscylacje strumienia w całym jego przebiegu następowały wokół zera, gdyż wtedy wartość strumienia szczytkowego zostaje zmniejszona do zera.

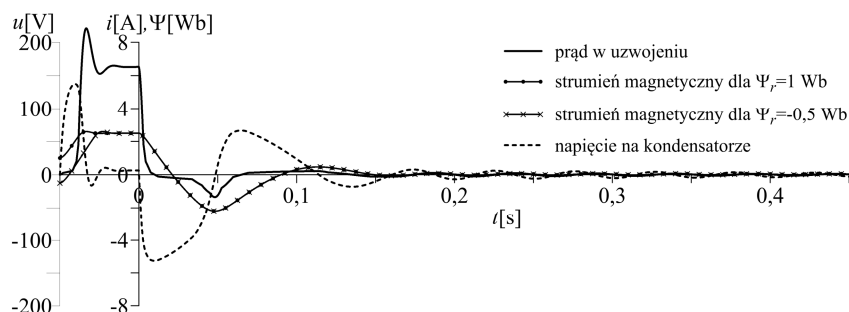
Z przebiegu strumienia magnetycznego przedstawionego na rys. 2 wynika, że jego wartość nie zostaje zmniejszona do zera. Symulacja następnej demagnetyzacji rdzenia z wartością strumienia szczytkowego ustaloną po pierwszej demagnetyzacji wykazała, że powtórne rozmagnesowanie wyraźnie poprawia jej skuteczność i strumień szczytkowy zostaje sprowadzony do zera.



Obliczenia symulacyjne dla układu demagnetyzacyjnego II przedstawiono na rys. 3. Tak samo, jak dla układu analizowanego powyżej, część przebiegów dla  $t < 0$  dotyczy procesu gromadzenia energii w układzie. Prąd przyjmuje wartość ustaloną, dla której punkt pracy na charakterystyce magnesowania rdzenia zostaje przesunięty od namagnesowania szczytkowego do stanu silnego nasycenia. Jest to widoczne w przebiegu strumienia magnetycznego w tym przedziale czasu. Strumień przyjmuje nową wartość początkową, od której zostaje oscylacyjnie sprowadzony do zera podczas demagnetyzacji zapoczątkowanej dla  $t = 0$ .



Rys. 2. Przebiegi obliczone w układzie demagnetyzacyjnym I



Rys. 3. Przebiegi obliczone w układzie demagnetyzacyjnym II

Na rys. 3, oprócz napięcia i prądu w obwodzie, przedstawiono przebiegi strumienia magnetycznego obliczone dla dwóch wartości strumienia szczytkowego  $\Psi_r$ . Można zauważyć, że w obu przypadkach demagnetyzacja jest jednako skuteczna. Jest to związane z tym, że bez względu na wartość strumienia szczytkowego, jaki występuje w rdzeniu przed rozpoczęciem ładowania indukcyjności, wartość początkowa strumienia magnetycznego w chwili rozpoczęcia rozmagnesowania jest taka sama. Jest to konsekwencją tego, że wartość prądu indukcyjności w chwili  $t = 0$  nie zależy od strumienia szczytkowego, lecz od parametrów układu: napięcia źródła i całkowitej rezystancji obwodu, w którym

plynie prąd ładowania indukcyjności. W efekcie proces demagnetyzacji przebiega zawsze tak samo, niezależnie od wartości strumienia szczątkowego i wartość końcowa strumienia jest taka sama.

## 5. BADANIA LABORATORYJNE

Przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne miały na celu zbadanie skuteczności demagnetyzacji, a w szczególności określenie, jaki wpływ mają na nią:

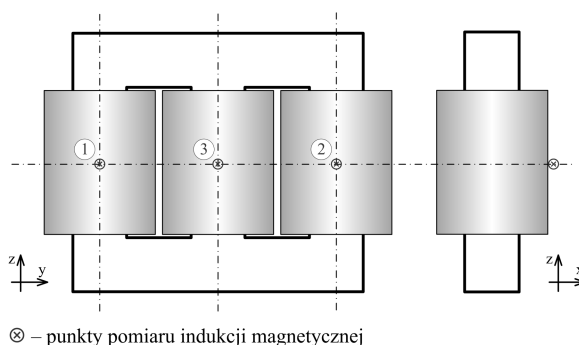
- częstotliwość oscylacji prądu rozmagnesowującego,
- ilość energii zgromadzonej w układzie demagnetyzacyjnym.

Badania przeprowadzono w układzie demagnetyzacyjnym I i II. Pomiarów dokonano dla transformatora trójfazowego o danych:  $S_n = 4,5$  kVA,  $U_{1n}/U_{2n} = 380/220$  V/V. Ogólny program każdego eksperymentu składał się z trzech operacji:

1. Rozmagnesowanie rdzenia transformatora prądem sinusoidalnym o malejącej amplitudzie.
2. Magnesowanie rdzenia prądem stałym o ustalonej wartości.
3. Rozmagnesowanie rdzenia za pomocą układu demagnetyzacyjnego.

Taka organizacja eksperymentu miała na celu zapewnienie powtarzalności warunków pomiaru, czyli np. stanu namagnesowania szczątkowego. Magnesowanie i demagnetyzacja rdzenia odbywały się z wykorzystaniem uzwojenia jednej – środkowej kolumny transformatora.

Odzwierciedleniem stanu namagnesowania szczątkowego transformatora jest wartość indukcja magnetycznej pola rozproszenia, jakie namagnesowany rdzeń wytwarza wokół siebie. Dlatego, aby kontrolować magnetyzm rdzenia, po każdej z operacji dokonywano pomiaru indukcji pola magnetycznego w wybranych punktach na zewnątrz niego. Orientację układu współrzędnych oraz położenie punktów pomiarowych pokazano na rys. 4.

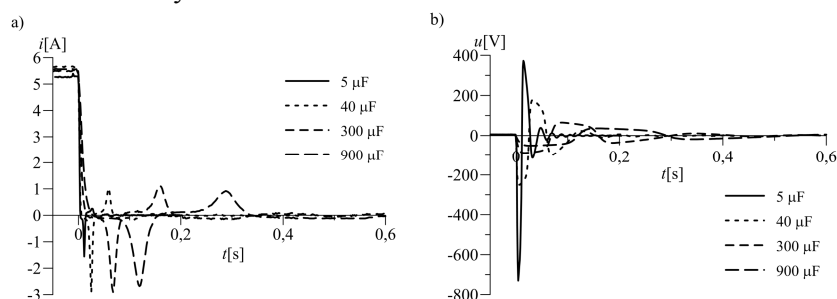


Rys. 4. Położenie punktów pomiaru indukcji magnetycznej pola rozproszenia



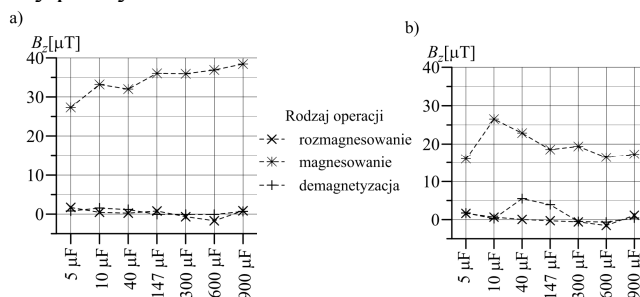
### 5.1. Badanie wpływu częstotliwości oscylacji

Zbadano skuteczność demagnetyzacji rdzenia przy różnych częstotliwościach prądu rozmagnezującego. Badania przeprowadzono w układzie demagnetyzacyjnym II, w którym jest łatwiej przedstawić przebieg demagnetyzacji tylko od częstotliwości oscylacji przy stałej ilości energii zgromadzonej w układzie. Zmianę częstotliwości uzyskiwano przez zmianę pojemności kondensatora. Stałość wartości energii wynikała z niezminiającej się w każdym eksperymencie wartości początkowej prądu. Zarejestrowane przebiegi prądu w uzwojeniu i napięcia na kondensatorze dla różnych pojemności kondensatora przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wyniki rejestracji w układzie demagnetyzacyjnym II dla różnych pojemności kondensatora: a) przebiegi prądu w uzwojeniu, b) przebiegi napięcia na kondensatorze

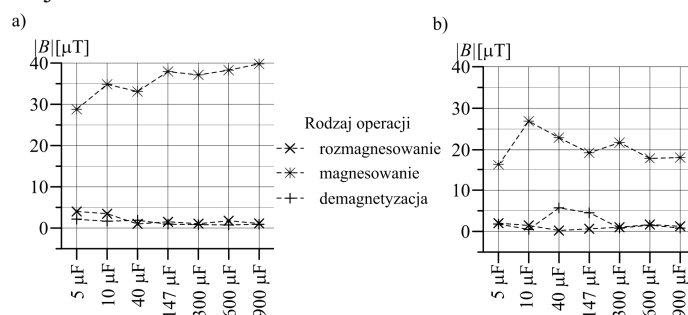
Dla wszystkich przypadków zmierzono wartości indukcji magnetycznej pola rozproszenia, jakie występowało wokół rdzenia po każdej z przeprowadzonych operacji (rozmagnezowanie, magnesowanie, demagnetyzacja). W celu wyeliminowania wpływu magnetyzmu ziemskiego eksperymenty przeprowadzono dla dwóch kierunków namagnesowania rdzenia, a następnie obliczoną różnicę wartości indukcji magnetycznej dla poszczególnych składowych przestrzennych. W ten sposób składnik wielkości mierzonych pochodzący od pola Ziemi został zredukowany praktycznie do zera.



Rys. 6. Wyniki pomiarów składowej wektora indukcji magnetycznej pola rozproszenia w osi z dla różnych pojemności  $C$ : a) na kolumnie bocznej, b) na kolumnie środkowej

Zestawienie wyników w postaci różnicowej dla składowej wektora indukcji magnetycznej w osi  $z$  przedstawiono na rys. 6a dla modułu wektora indukcji na rys. 7. Przedstawione wartości składowej wektora indukcji magnetycznej w osi  $z$  są zbliżone do wartości modułu wektora indukcji, co świadczy o tym, że składowe w osiach  $x$  i  $y$  są mało znaczące. Zatem do identyfikacji stanu namagnesowania rdzenia wystarcza znajomość wartości składowej w osi  $z$  lub wartości modułu wektora.

Analiza przedstawionych wyników wykazuje, że częstotliwość oscylacji w badanym przedziale zmienności nie ma istotnego znaczenia dla skuteczności demagnetyzacji.



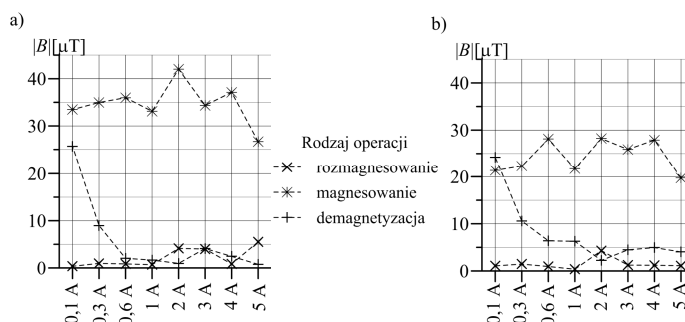
Rys. 7. Wyniki pomiarów modułu wektora indukcji magnetycznej pola rozproszenia dla różnych pojemności  $C$ : a) na kolumnie bocznej, b) na kolumnie środkowej

## 5.2. Badanie wpływu ilości energii

Zbadano skuteczność demagnetyzacji rdzenia przy różnych wartościach energii zgromadzonej w obwodzie na początku procesu demagnetyzacji. W układzie demagnetyzacyjnym II o ilości energii decyduje wartość prądu w uzwojeniu, gdyż ilość energii zgromadzonej w pojemności  $C$  przed rozpoczęciem procesu demagnetyzacji jest znikoma. Badania przeprowadzono zatem dla kilku wartości początkowych prądu w uzwojeniu. Jak poprzednio, opracowano wyniki różnicowe pomiarów indukcji magnetycznej pola rozproszenia. Przedstawiono je na rys. 8. Na przedstawionych na nim wykresach można zaobserwować zwiększanie się wartości indukcji magnetycznej zmierzonych po demagnetyzacji przeprowadzonej przy małych wartościach początkowych prądu. Efekt ten występuje we wszystkich punktach pomiarowych zarówno dla składowej wektora indukcji w osi  $z$ , jak i dla modułu wektora indukcji.

Wartość napięcia, do którego należy naładować kondensator w układzie I powinna zapewnić zgromadzenie co najmniej takiej samej energii, co w układzie II. W celu określenia ilości energii gromadzonej przez układ demagnetyzacyjny II zarejestrowano przebiegi prądu w uzwojeniu pierwotnym, wykorzystywanym w układzie demagnetyzacyjnym i napięcia indukowanego

w uzwojeniu wtórnym, umieszczonym na tej samej kolumnie, podczas ładowania układu energią ze źródła zewnętrznego. Iloczyn tego napięcia, przeliczonego na stronę pierwotną transformatora, i prądu określał moc chwilową w indukcyjności. Po scałkowaniu mocy chwilowej uzyskano energię, jaka została zgromadzona w indukcyjności. Pomiarów wykonano dla kilku wartości początkowych prądu demagnetyzacji  $i_p$ . W celu obliczenia napięcia, do jakiego ma być naładowany kondensator w układzie demagnetyzacyjnym I, posłużono się wzorem (9), do którego podstawiono wartość energii zgromadzonej w układzie demagnetyzacyjnym II. Wartości prądu  $i_p$ , energii  $E$  i obliczone na ich podstawie wartości napięcia  $U_C$  przedstawiono w tabeli 2. Obliczenia wykonano dla jednej z ustalonych pojemności układu demagnetyzacyjnego.

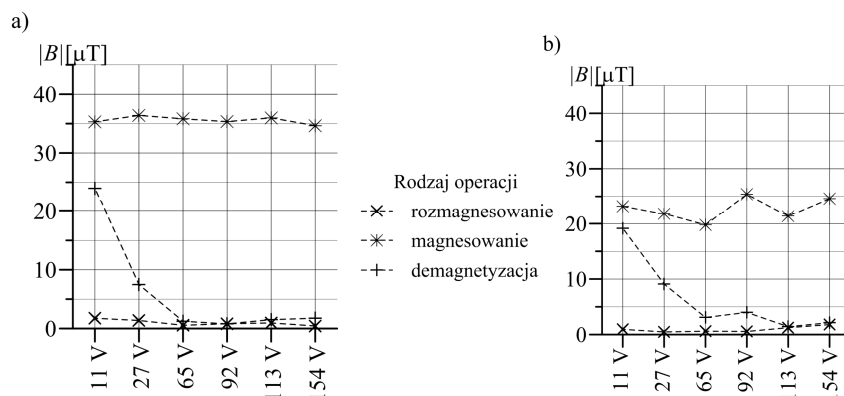


Rys. 8. Wyniki pomiarów modułu wektora indukcji magnetycznej pola rozproszenia dla różnych wartości prądu  $i_p$ : a) na kolumnie bocznej, b) na kolumnie środkowej

Tabela 2. Wartości napięcia  $U_C$  obliczone dla zmierzonych wartości energii  $E$

$i_p$ [A]	0,1	0,3	1	2	3	5
$E$ [J]	0,01	0,05	0,31	0,63	0,94	1,74
$U_C$ [V]	11	27	65	92	113	154

Dla obliczonych wartości napięcia  $U_C$  zbadano na stanowisku laboratoryjnym skuteczność demagnetyzacji w układzie demagnetyzacyjnym I, postępując według tej samej procedury, którą przedstawiono w podrozdziale 5.1 i wyznaczając wyniki różnicowe indukcji rozproszenia. Rezultaty przedstawia rys. 9. Uzyskane wyniki są w dużej zgodności z pokazanymi na rys. 8. Dotyczy to indukcji magnetycznej pola rozproszenia zmierzonej po przeprowadzonej demagnetyzacji. Skuteczność demagnetyzacji maleje (wzrasta wartość indukcji rozproszenia) w taki sam sposób zarówno dla malejących wartości  $i_p$ , jak i malejących wartości  $U_C$ .



Rys. 9. Wyniki pomiarów modułu wektora indukcji magnetycznej pola rozproszenia dla różnych wartości napięcia  $U_C$ : a) na kolumnie bocznej, b) na kolumnie środkowej

## 6. WNIOSKI

Z analizy wyników badań można stwierdzić, że demagnetyzacja rdzenia za pomocą oscylacji prądu w obwodzie LC pozwala na wyraźne obniżenie magnetyzmu szczytkowego do wartości indukcji magnetycznej bliskich zera. Efekt ten nie wykazuje silnej zależności od częstotliwości oscylacji. Oznacza to, że pojemność kondensatora w układzie można dobierać w dość szerokim przedziale wartości. Zasadniczym kryterium przy określaniu początkowej wartości napięcia na kondensatorze jest zgromadzenie odpowiedniej ilości energii w układzie przed rozpoczęciem demagnetyzacji. Podstawą do określenia tej energii jest wartość prądu w punkcie nasycenia na charakterystyce  $\Psi(i)$ .

## LITERATURA

- [1] Brunke J. H., Frohlich K. J.: Elimination of transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, January 2001.
- [2] Frame J.G., Mohan N., Liu T.: Hysteresis modeling in an electromagnetic transients program, IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems, vol. PAS-101, No. 9 September 1982.
- [3] Gawęcki L.: Statyczne i dynamiczne właściwości układów ferromagnetycznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka nr 31, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1973.
- [4] Morrish A. H.: Fizyczne podstawy magnetyzmu. PWN Warszawa 1970.

**SYSTEM FOR DEMAGNETIZATION OF POWER TRANSFORMER CORE**

The paper presents two concepts of demagnetization system for transformer core, whose task is to bring residual fluxes as close as possible to zero. Systems have been developed on the assumption that the transformer windings are used for the demagnetization, and demagnetization current is generated as a result of free oscillations in an LC circuit. The functioning of the systems was analyzed by computer simulations. Determination of parameters for both systems was discussed. The paper presents also the results of laboratory tests which show that the proposed systems effectively reduces the state of magnetization of the core.

*(Received: 1. 02. 2016, revised: 9. 03. 2016)*