

Henryk Słupiński

Instytut Konstrukcji i Technologii
Urządzeń Automatyki i Elektroniki

DYNAMICZNE PROCESY MAGNESOWANIA RDZENIA FERROMAGNETYCZNEGO W WYBRANYCH UKŁADACH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dynamicznych procesów magnesowania rdzenia ferromagnetycznego przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym w układzie pracy dławikowego wzmacniacza magnetycznego, jednopółkownikowego samonasycającego wzmacniacza magnetycznego oraz w układzie magnesowania rdzenia prądem stałym i napięciem sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkownikowym. Taki wybór układów był dokonany, aby można było wyciągnąć ogólne wnioski o przebiegu dynamicznych procesów magnesowania rdzenia magnetycznych w różnych układach.

Praca niniejsza stanowi kontynuację metody fizykałnej interpretacji pracy wzmacniaczy magnetycznych [lit. 3, 4, 5].

Artykuł wykracza tematycznie poza układy wzmacniaczy magnetycznych ukazując szereg wspólnych cech zjawisk dynamicznego procesu magnesowania rdzenia w różnych układach.

Dokładniejsze rozeznanie fizykałnych zjawisk dynamicznego procesu magnesowania rdzenia ferromagnetycznego, w dowolnym układzie pracy, umożliwi w konsekwencji precyzyjniejsze przewidywanie właściwości urządzeń zbudowanych na bazie elementów magnetycznych oraz ułatwi prace projektowe i konstrukcyjne.

1. Wstęp

Mimo powszechnego zastosowania materiałów magnetycznych, jako podstawowego elementu konstrukcyjnego wielu urządzeń, w tym również automatyki, znajomość procesów magnesowania przebiegających w materiale magnetycznym oraz wpływu tych procesów na pracę układu nie jest zadawalająca [lit. 5].

Na ogół w zależności od układu, w którym pracuje rdzeń, przyjmuje się pewną aproksymację pętli histerezy i w oparciu o nią tłumaczy się przebiegi zachodzących procesów. Przyjmowane aproksymacje oraz rozpatrywanie przebiegających procesów od strony statycznych zjawisk, powodują zubożenie analitycznego opisu pracy urządzeń oraz uniemożliwiają wyciągnięcie ogólnych wniosków o zachowaniu się rdzenia magnetycznego, i w konsekwencji nie tłumaczą w dostatecznym stopniu tak przebiegów, jak i zniekształceń charakterystyki wyjścia. Odnosi się to w szczególności do wzmacniaczy magnetycznych.

Właściwości rdzenia magnetycznego stanowią podstawowy czynnik, który decyduje o przebiegu charakterystyki wyjścia wzmacniacza magnetycznego.

Stąd, określenie funkcji $B = f(H)$ odzwierciedlającej zachowanie się rdzenia w procesie dynamicznego magnesowania stwarza podstawy przewidywania, możliwie najdokładniej, charakterystyki wyjścia.

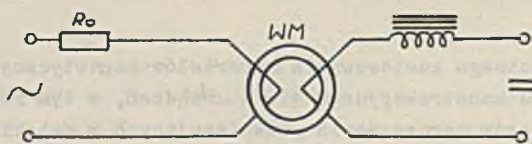
Praca niniejsza ma na celu analizę dynamicznych procesów magnesowania rdzenia, w układzie pracy dławikowego wzmacniacza magnetycznego, jednopółkowego samonasycalnego wzmacniacza magnetycznego oraz w układzie magnesowania rdzenia prądem stałym i napięciem sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowym. Taki wybór układów miał na celu przeprowadzenie analizy pracy podstawowych grup wzmacniaczy magnetycznych oraz wyciągnięcie ogólnych wniosków o przebiegu dynamicznych procesów w rdzeniu ferromagnetycznym magnesowanym równocześnie dwoma polami.

W artykule przedstawiono i opisano zmiany zachodzące w rdzeniu w procesie dynamicznego magnesowania oraz wpływ tych zmian na pracę układu, w którym ten rdzeń pracuje.

Artykuł nie wyczerpuje w pełni opisu dynamicznych procesów magnesowania. Złożoność tych procesów stanowi dużą trudność w analitycznym ich opisanie. Praca niniejsza stanowi kontynuację metody fizycznej interpretacji pracy wzmacniaczy magnetycznych. Tematycznie artykuł wykracza poza układy wzmacniaczy magnetycznych, mając na celu ukazanie wspólnych cech zjawisk procesu magnesowania rdzenia w różnych układach.

2. Dynamiczne pętle histerezy przy jednoczesnym magnesowaniu rdzenia napięciem sinusoidalnym zmiennym i polem stałym

Rdzeń magnesujemy w układzie jak na rysunku 1. W obwodzie prądu stałego włączono dławik dla wyeliminowania efektu transformatorowego. Rysunek 1



Rys. 1. Wzmacniacz magnetyczny dławikowy

przedstawia wzmacniacz magnetyczny dławikowy. Pętle histerezy, przy tym sposobie magnesowania rdzenia, obserwowano w układzie na rysunku 2.

U_{zas} - napięcie zasilania,

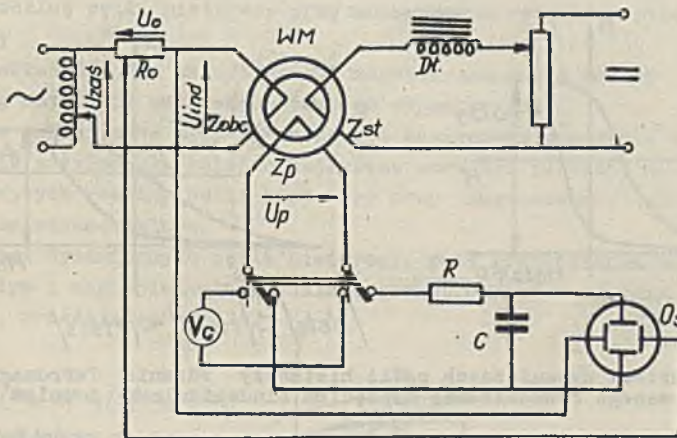
U_0 - napięcie na oporności obciążenia R_0 ,

U_{ind} - napięcie na uzwojeniu obciążenia Z_{obc} ,

U_p - napięcie na uzwojeniu pomiarowym Z_p ,

R, C - elementy układu całkującego,

- O_s - oscyloskop,
 Dz - dławik,
 R_o - oporność obciążenia,
 z_{obc} - uzwojenie obciążenia,
 z_{st} - uzwojenie sterujące,
 z_p - uzwojenie pomiarowe,
 V_c - woltomierz cyfrowy,
 WM - rdzeń magnetyczny.



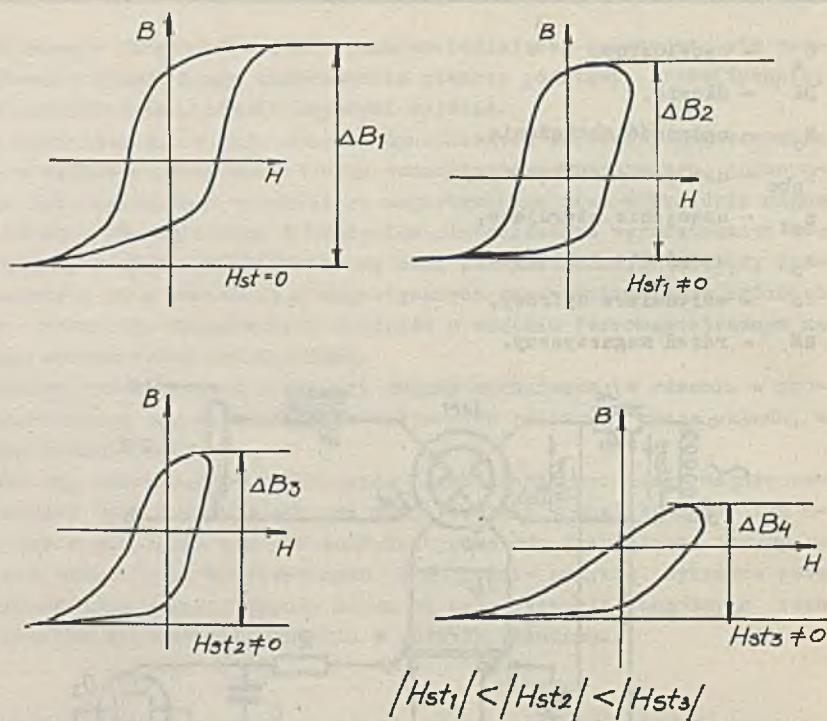
Rys. 2. Układ do pomiarów i obserwacji dynamicznych przebiegów w rdzeniu magnesowanym równocześnie napięciem sinusoidalnym i polem stałym

Aby zaobserwować pętle histerezy rdzenia magnetycznego w układzie pracy wzmacniacza magnetycznego dławikowego, układ pracy tego wzmacniacza uzupełniono uzwojeniem pomiarowym z_p (rys. 2), wzorując się na układzie metody Roberta 1, 3, 5. W układzie, wg rys. 2, mamy możliwość obserwacji dynamicznej pętli histerezy w układzie współrzędnych: indukcja magnetyczna w rdzeniu - natężenie pola magnetycznego wywołane prądem obciążenia. W układzie tym istnieją również możliwości obserwacji indukcji magnetycznej w rdzeniu w funkcji czasu.

W układzie wykonano pomiary średnich wartości napięć: U_{zas} , U_{ind} , U_p i U_o w funkcji prądu sterującego.

Pomiary napięć były wykonane woltomierzem cyfrowym produkcji radzieckiej typ BK7 - 10 A/1.

Kształt pętli histerezy w zależności od zmian natężenia pola sterującego przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Kształt dynamicznych pętli histerezy rdzenia ferromagnetycznego magnesowanego równocześnie napięciem sinusoidalnym i polem stałym

Cechą charakterystyczną tego sposobu magnesowania jest to, że ze zmianą prądu sterującego (natężenia pola magnetycznego sterującego) następują w rdzeniu zmiany indukcji magnetycznej (ΔB).

Zmiany prądu sterującego powodują zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) i równocześnie zmiany średnich wielkości mierzonych napięć U_{ind} , U_p , U_o .

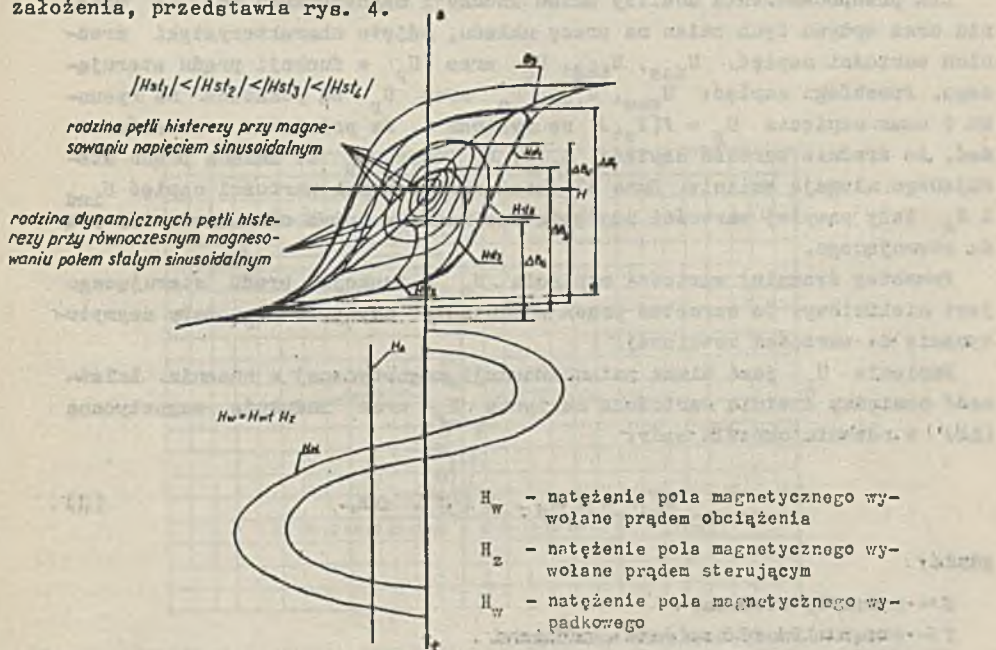
Pomiar średnich wartości napięć U_{zas} , U_{ind} , U_p oraz U_o należy traktować jako proces linearyzacji obwodu (literatura 2). Rzeczywiste przebiegi napięć u_{zas} , u_{ind} , u_o oraz u_p zastępujemy zgodnie z obowiązującymi regułami przez równoważne sinusoidy o amplitudach, które w rzeczywistości są wartościami otrzymanymi na drodze scałkowania wartości chwilowych. Na przykład, jeśli A oznacza amplitudę przebiegu sinusoidalnego, którego wartość jest równoważna średniej wartości rzeczywistego przebiegu, to amplitudę A określa wzór:

$$A = \frac{2\pi}{T} \int_0^{T/2} A(t) dt. \quad (1)$$

Kształt dynamicznych pętli histerezy w układzie współrzędnych: indukcja magnetyczna w rdzeniu - wypadkowe natężenie pola magnetycznego magnesującego rdzeń, w zależności od zmian prądu sterującego możemy wyznaczyć przyjmując następujące założenia:

- pole magnetyczne wypadkowe magnesujące rdzeń jest równe sumie poszczególnych pól składowych magnesujących rdzeń;
- składowa zmienna natężenia pola magnetycznego (wywołana prądem obciążenia) ma przebieg sinusoidalny, zaś wartość jej uzyskujemy na drodze uśredniania przebiegu rzeczywistego;
- indukcja magnetyczna w każdej chwili przyjmuje największą wartość spośród możliwych dla danych warunków dynamicznego procesu magnesowania;
- znamy rodzinę pętli histerezy przy magnesowaniu rdzenia napięciem sinusoidalnym;
- znając składowe pola magnetycznego magnesujące rdzeń możemy wyznaczyć przebieg natężenia pola magnetycznego wypadkowego;
- indukcja magnetyczna przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia dwoma polami będzie przyjmowała kolejno najwyższe wartości położone na krzywej spośród krzywych rodziny pętli histerezy przy magnesowaniu rdzenia tylko napięciem sinusoidalnym.

Przebiegi dynamicznych pętli histerezy, przy równoczesnym magnesowaniu polem stałym i napięciem sinusoidalnym skonstruowane w oparciu o powyższe założenia, przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Wyznaczenie dynamicznych pętli histerezy rdzenia magnesowanego równocześnie polem sinusoidalnym i stałym

Przy wyznaczaniu przebiegów dynamicznych pętli histerezy, przy równoczesnym magnesowaniu polem stałym i napięciem sinusoidalnym, dla uproszczenia przyjęto stałą wartość amplitudy natężenia pola magnetycznego wywołanego prądem obciążenia. Z rysunku 4 widać, że zmiany natężenia pola sterującego powodują zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu. Zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) będą zachodziły w ten sposób, iż będą one przyjmować największe wartości dla danych warunków dynamicznego procesu magnesowania. Górne i dolne wartości indukcji magnetycznej (ΔB) leżą na krzywej, będącej miejscem geometrycznym wierzchołków rodziny dynamicznych pętli histerezy. W tym przypadku magnesowania rdzenia jest to krzywa B_3 (rysunek 4). Przy danych parametrach obwodu, w którym pracuje rdzeń, w zależności od wielkości napięcia zasilającego przy prądzie sterującym równym zero, rdzeń będzie magnesowany mniej lub bardziej głęboko. Stąd zmiany indukcji magnetycznej w rdzeniu, przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego, w zakresie zmian prądu sterującego, będą różne. Amplituda napięcia zasilania ma decydujący wpływ na charakter zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu. Obserwacja zmian dynamicznej pętli histerezy, przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia polem stałym i napięciem sinusoidalnym, przy czym pole stałe zmienia się w dowolnych granicach, pozwala stwierdzić, że rdzeń przy tym sposobie magnesowania stanowi element o zmiennej indukcji magnetycznej (ΔB), będącej funkcją zmian pola sterującego.

Dla przeprowadzenia analizy zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu oraz wpływu tych zmian na pracę układu, zdjęto charakterystyki średnich wartości napięć: U_{zas} , U_{ind} , U_0 oraz U_p w funkcji prądu sterującego. Przebiegi napięć: U_{zas} , U_{ind} , U_0 oraz U_p są pokazane na rysunku 5 oraz napięcia $U_p = f(I_{st})$ na rysunku 6. Na podstawie wykresów widać, że średnia wartość napięć: U_{ind} , U_0 oraz U_p ze zmianą prądu sterującego ulegają zmianie. Suma algebraiczna średnich wartości napięć U_{ind} i U_0 leży powyżej wartości napięcia zasilania w całym zakresie zmian prądu sterującego.

Przebieg średniej wartości napięcia U_0 w funkcji prądu sterującego jest nieliniowy. Ze wzrostem prądu sterującego napięcie U_0 dąży asymptotycznie do wartości ustalonej.

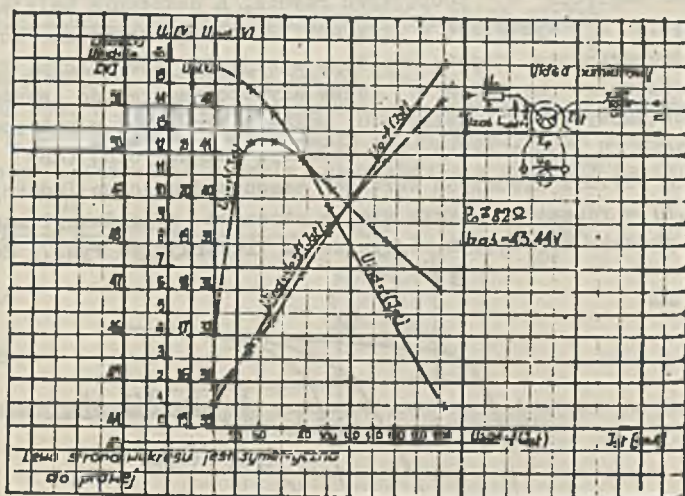
Napięcie U_p jest miarą zmian indukcji magnetycznej w rdzeniu. Zależność pomiędzy średnią wartością napięcia U_p oraz indukcją magnetyczną (ΔB) w rdzeniu określa wzór:

$$U_p = 4 \cdot z_p \cdot S \cdot f \cdot \Delta B, \quad (2)$$

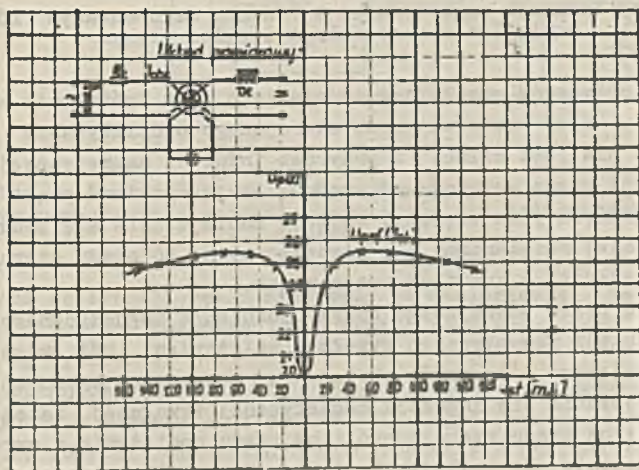
gdzie:

S - przekrój rdzenia,

f - częstotliwość napięcia zasilania.

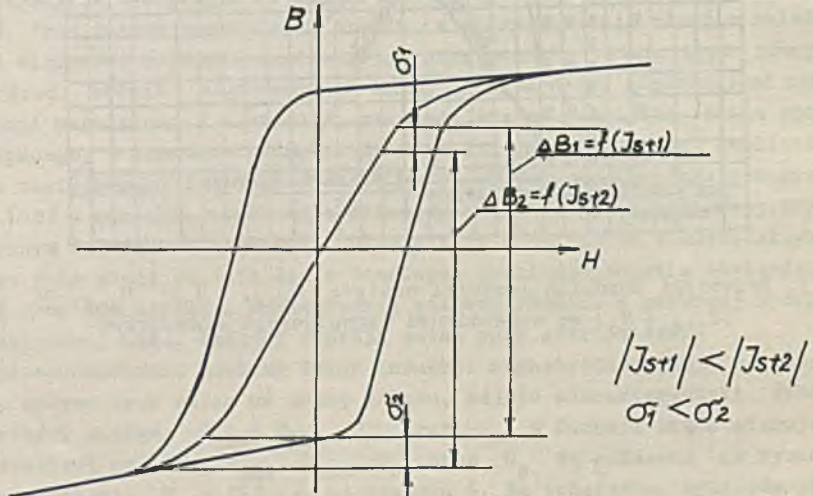


Rys. 5. Przebiegi średnich wartości napięć: U_{zas} , U_o , U_{ind} , U_p oraz $(U_{ind} + U_o)$ we wzmacniaczu magnetycznym dławikowym



Rys. 6. Przebieg średniej wartości napięcia $U_p = f(I_{st})$ we w.m. dławikowym, dla dodatnich i ujemnych wartości prądu sterującego

Z wykresów wg rys. 5 i 6 widać, że ze wzrostem prądu sterującego średnia wartość napięcia U_p początkowo rośnie, a następnie maleje. Taki przebieg napięcia U_p występuje w układach, które są rozwiązane konstrukcyjnie jako dwurdzeniowe, objęte wspólnym uzwojeniem sterującym. Ze wzrostem prądu sterującego napięcia U_p dąży asymptotycznie do wartości ustalonej. Początkowy wzrost napięcia U_p można wytłumaczyć w następujący sposób. Napięcie U_p jest związane z indukcją magnetyczną (ΔB) w rdzeniu zależnością (2). Dla niedużych wartości prądu sterującego indukcja magnetyczna (ΔB) w rdzeniu zwiększa się, w stosunku do indukcji magnetycznej (ΔB) przy prądzie sterującym równym zero. Ilustruje to rys. 7. Można przy-



Rys. 7. Zmiany indukcji magnetycznej w rdzeniu magnesowanym równocześnie napięciem sinusoidalnym i polem stałym

puszczać, że przyczyną wywołującą to zjawisko jest opóźnienie magnetyczne (L , 1, 2). Przy małej wartości prądu sterującego oddziaływanie opóźnienia magnetycznego nie jest silne, i przyrost indukcji magnetycznej wywołanej natężeniami pól magnetycznych: od prądu sterującego i od prądu obciążenia, o zwrotach zgodnych jest większy, aniżeli zmniejszanie się indukcji magnetycznej wywołanej natężeniami pól magnetycznych: od prądu sterującego i od prądu obciążenia, o zwrotach przeciwnych.

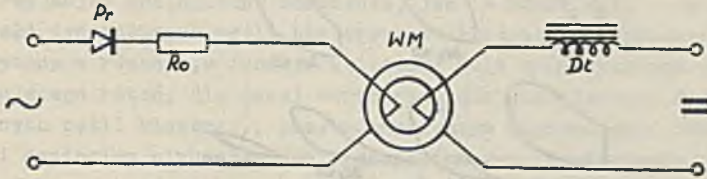
Ze wzrostem prądu sterującego wpływ opóźnienia magnetycznego rośnie, i przyrosty indukcji magnetycznej wywołane natężeniami pól magnetycznych: od prądu sterującego i od prądu obciążenia, o zwrotach zgodnych, nie kompensują zmniejszania się indukcji magnetycznej wywołanej natężeniami pól magnetycznych: od prądu sterującego i od prądu obciążenia, o zwrotach przeciwnych, i napięcie U_p maleje. Napięcie U_p ze wzrostem prądu sterującego dąży asymptotycznie do wartości ustalonej.

Napięcie U_{ind} w całym przedziale zmian prądu sterującego maleje. Ze wzrostem prądu sterującego napięcie U_{ind} dąży asymptotycznie do wartości ustalonej.

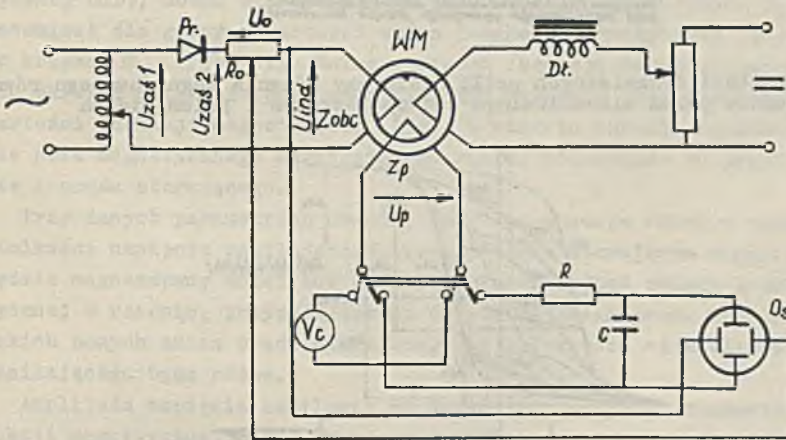
3. Dynamiczne pętle histerezy przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia napięciem sinusoidalnym jednopółkowym i polem stałym

Rdzeń magnesujemy w układzie jak na rys. 8.

Układ na rys. 8 przedstawia wzmacniacz magnetyczny samonasycalny jednopółkowy z dużą opornością w obwodzie sterującym. Pętle histerezy, przy tym sposobie magnesowania rdzenia, obserwowano w układzie na rysunku 9.



Rys. 8. Wzmacniacz magnetyczny z wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym jednopółkowy

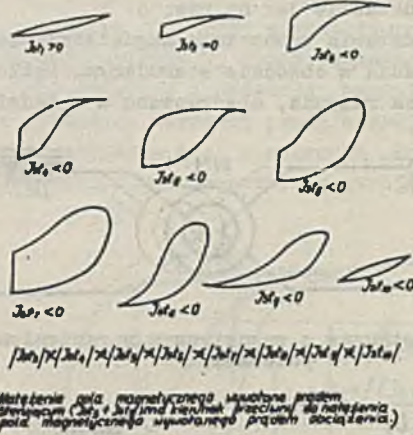


Rys. 9. Układ do pomiarów i obserwacji dynamicznych przebiegów w rdzeniu magnesowanym równocześnie napięciem sinusoidalnym jednopółkowym i polem stałym

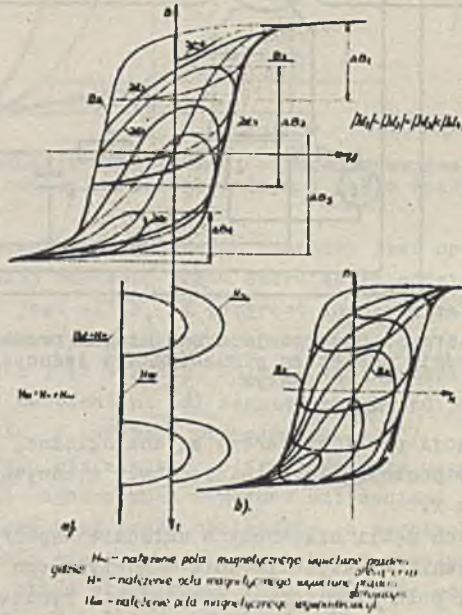
Możliwości obserwacji pętli histerezy są analogiczne, jak w układzie wg rysunku 2. Pomiaru poszczególnych napięć były wykonywane podobnie jak w układzie wg rysunku 2.

Kształt dynamicznych pętli histerezy w układzie współrzędnych: indukcja magnetyczna w rdzeniu - natężenie pola magnetycznego wywołane prądem obciążenia, w funkcji pola sterującego przedstawia rysunek 10.

Obserwacja pętli histerezy wykazuje, że indukcja (ΔB) ze zmianą pola sterującego ulega zmianie. Zmiany prądu sterującego powodują zmiany indukcji magnetycznej (ΔB), i równocześnie zmiany średnich wielkości mierzo-



Rys. 10. Kształt dynamicznych pętli histerezy rdzenia magnesowanego równocześnie polem sinusoidalnym jednopółkowym i polem stałym



Rys. 11. Wyznaczenie dynamicznych pętli histerezy rdzenia magnesowanego równocześnie napięciem sinusoidalnym jednopółkowym i polem stałym

nych napięć U_{zas} , U_o , U_p . Napięcie U_p jest związane z indukcją magnetyczną (ΔB) w rdzeniu zależnością:

$$U_p = 2 \cdot f \cdot S \cdot \Delta B. \quad (3)$$

Zmiany napięcia U_p są miarą zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu.

Przyjmując analogiczne założenia, jak w punkcie 2, możemy określić kształt dynamicznych pętli histerezy w układzie współrzędnych: indukcja magnetyczna w rdzeniu, w funkcji natężenia pola magnetycznego wypadkowego magnesującego rdzeń, dla danej wartości prądu sterującego. Przebiegi dynamicznych pętli histerezy, przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia polem stałym i napięciem sinusoidalnym jednopółkowym, przedstawia rysunek 11. Górne i dolne wartości indukcji magnetycznej (ΔB) leżą na krzywej będącej miejscem geometrycznym wierzchołków rodziny dynamicznych pętli histerezy. W tym przypadku magnesowania, dla dowolnych wartości zmian indukcji magnetycznej (ΔB), można w przybliżeniu uważać, że jest to krzywa B_2 (rys. 11), natomiast dla górnych wartości zmian indukcji magnetycznej (ΔB), że jest to krzywa B_3 (rys. 11). Dolne wartości indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu określa natężenie pola magnetycznego wywołane prądem sterującym. Górne wartości indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu określa wypadkowe natężenie pola magnetycznego magnesującego rdzeń, pochodzące od prądu obciążenia i prądu sterującego.

Przy danych parametrach obwodu, w którym pracuje rdzeń, w zależności od wielkości napięcia zasilającego, przy prądzie sterującym równym zero, rdzeń będzie magnesowany mniej lub bardziej głęboko. Stąd zmiany indukcji magnetycznej w rdzeniu, przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego, dla takich samych zmian prądu sterującego, w zależności od wielkości napięcia zasilającego będą różne.

Amplituda napięcia zasilania ma decydujący wpływ na charakter zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu. Ilustruje to rysunek 11. W przypadku dużej wartości napięcia zasilania (rys. 11), a więc głębokiego magnesowania rdzenia, zmiany dolnych wartości indukcji magnetycznej spowodowane zmianą pola sterującego i określone tą wielkością pola sterującego, są znacznie większe aniżeli zmiany górnych wartości indukcji magnetycznej określanych wielkością wypadkowego natężenia pola magnetycznego. W tym przypadku magnesowania zmiany górnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB), w zakresie zmian prądu sterującego, będą zachodziły na odcinku nasycenia granicznej pętli histerezy. Dlatego zmiany górnej wartości indukcji magnetycznej (ΔB) są w tym przypadku bardzo małe i indukcja magnetyczna (ΔB) ze wzrostem prądu sterującego będzie rosła. Przy dowolnie dużym wzroście prądu sterującego, przy czym natężenie pola magnetycznego przez niego wywołane ma zwrot przeciwny do natężenia pola magnetycznego od prądu obciążenia, miejscem geometrycznym zmian dolnych wartości indukcji magnetycz-

nej (ΔB) będzie odcinek nasycenia granicznej pętli histerezy. Zmiany górnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB) będą się odbywać po krzywej B_3 (rys. 11), ale już nie w strefie nasycenia, i zmiany górnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB) będą obecnie większe, aniżeli zmiany dolnej wartości indukcji magnetycznej. Indukcja magnetyczna (ΔB) w tym zakresie zmian prądu sterującego będzie maleć.

W przypadku mniejszej wartości napięcia zasilającego (rys. 11a), zmiany górnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB) mogą zachodzić już na stromej części krzywej B_3 wówczas, zanim dolna wartość indukcji magnetycznej (ΔB) zacznie się przemieszczać po odcinku nasycenia granicznej pętli histerezy. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej (ΔB) będzie w tym przypadku magnesowania mniejsza i wystąpi przy mniejszej wartości prądu sterującego, aniżeli w przypadku poprzednim.

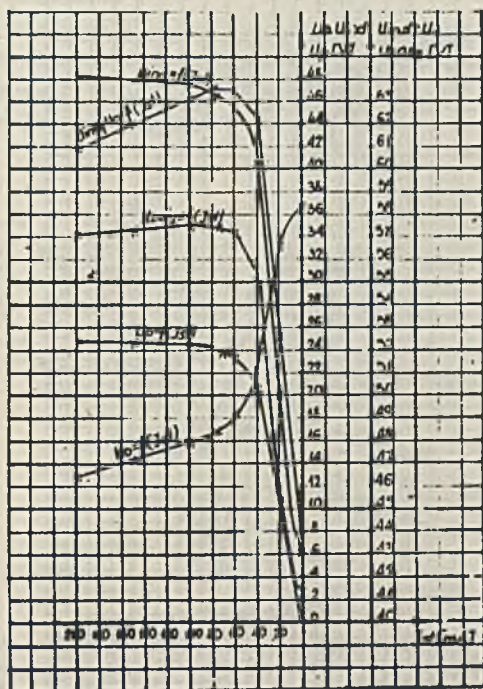
Ze wzrostem prądu sterującego, tak samo jak poprzednio, indukcja magnetyczna będzie początkowo rosnąć, a następnie maleć. Obserwacja dynamicznych pętli histerezy w tym układzie magnesowania rdzenia wykazuje, że przemieszczanie się górnych i dolnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB) oraz zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) ze zmianą prądu sterującego, odbywają się w sposób płynny, w całym zakresie zmian prądu sterującego. W całym przedziale zmian prądu sterującego, przemieszczaniu się dolnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB), towarzyszy równocześnie przemieszczanie się górnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB).

Obserwacja zmian dynamicznych pętli histerezy, przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia polem stałym i napięciem sinusoidalnym jednopółkowym, przy czym pole stałe zmienia się w dowolnych granicach pozwala stwierdzić, że rdzeń przy tym sposobie magnesowania stanowi element o zmiennej indukcji magnetycznej (ΔB), będącej funkcją pola sterującego.

Dla przeprowadzenia analizy zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu w zależności od zmian prądu sterującego oraz wpływu tych zmian na pracę układu, zdjęto charakterystyki średnich wartości napięć: U_{zas1} , U_{zas2} , U_{ind} , U_0 i U_p w funkcji prądu sterującego. Aby ocenić wpływ prostownika na pracę układu, wykonano pomiary zmian napięcia U_{zas2} oraz U_{zas1} .

Przebiegi średnich wartości napięć U_{zas1} , U_{zas2} , U_{ind} , U_0 oraz U_p , w funkcji prądu sterującego są przedstawione na rysunkach 12 i 13. Na podstawie wykresów widać, że napięcia U_{zas2} , U_{ind} , U_0 oraz U_p ze zmianą prądu sterującego ulegają zmianie. Suma algebraiczna średnich wartości napięć U_{ind} i U_0 w całym zakresie zmian prądu sterującego leży powyżej średniej wartości napięcia zasilania (U_{zas2}). Napięcie U_{zas2} nie jest stałe i określa wpływ elementu prostującego na pracę obwodu.

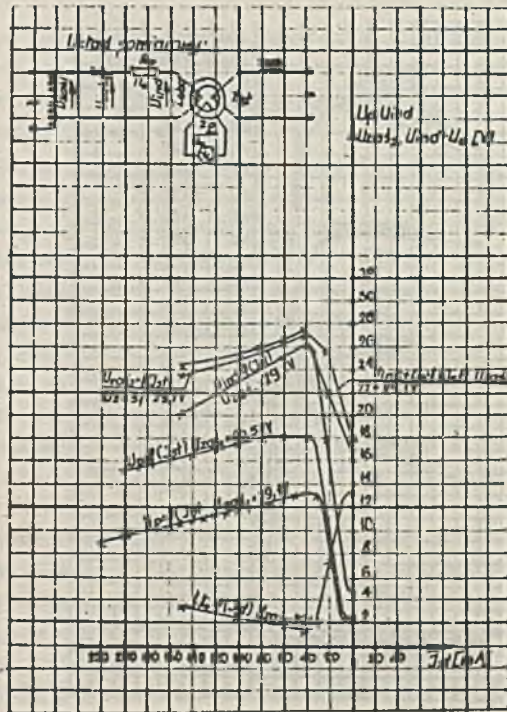
Zmiany napięcia U_0 , w pewnym zakresie zmian prądu sterującego, można uważać za liniowe. W zależności od wielkości napięcia zasilania, zmiany napięcia U_0 przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego będą różne. Przy wzroście prądu sterującego w kierunku dodatnim lub ujemnym napięcie U_0 będzie dążyć asymptotycznie do wartości ustalonej.



Rys. 12. Przebieg średnich wartości napięć U_o , U_{ind} , U_{zas1} , U_{zas2} oraz $(U_{ind} + U_o)$ we w.m. samonasycalnym przy napięciu zasilania doprowadzającym rdzeń do nasycenia

Zmiany napięcia U_{ind} w pewnym zakresie zmian prądu sterującego, można uważać za liniowe. W zależności od wielkości napięcia zasilania zmiany napięcia U_{ind} , przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego są różne. Przy wzroście prądu sterującego w kierunku dodatnim lub ujemnym napięcie U_{ind} dążyć będzie asymptotycznie do wartości ustalonej.

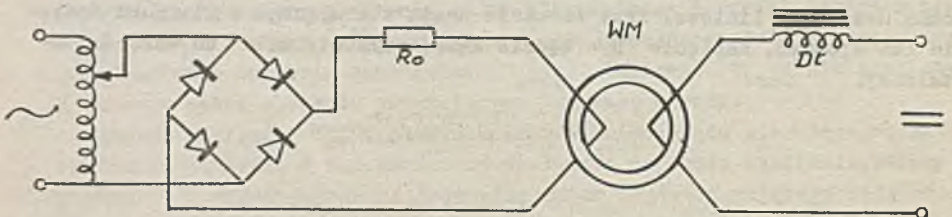
Zmiany napięcia U_p , w pewnym zakresie zmian prądu sterującego również można uważać za liniowe. Przy wzroście prądu sterującego w kierunku dodatnim lub ujemnym, napięcie U_p będzie dążyć asymptotycznie do wartości ustalonej.



Rys. 13. Przebiegi średnich wartości napięć U_o , U_{ind} , $U_{zaś1}$, $U_{zaś2}$ i $(U_{ind} + U_o)$ w.m. samonasycalnym jednopółkowym przy napięciu zasilania nie doprowadzającym rdzeń do stanu nasycenia

4. Dynamiczne pętle histerezy przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia napięciem sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowym i polem stałym

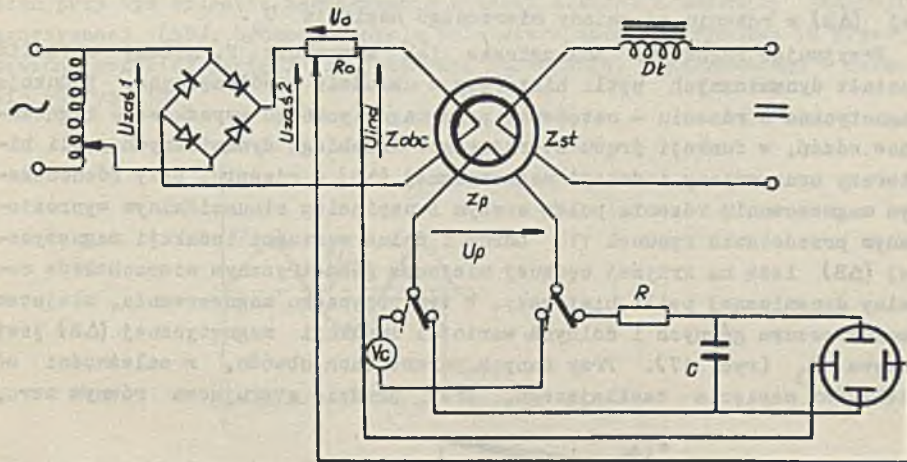
Rdzeń magnesujemy w układzie, jak na rysunku 14.



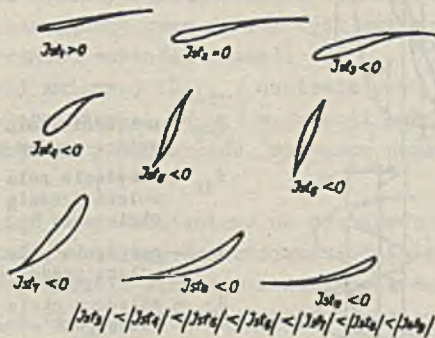
Rys. 14. Układ równoczesnego magnesowania rdzenia napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

Pętle histerezy przy tym sposobie magnesowania rdzenia obserwowano w układzie, jak na rysunku 15.

Możliwości obserwacji pętli histerezy są analogiczne jak w układzie wg rysunku 2. Pomiary poszczególnych napięć wykonywano podobnie jak w układzie wg rysunku 2. Zmiany dynamicznych pętli histerezy w funkcji natężenia pola sterującego przedstawia rysunek 16.



Rys. 15. Układ do pomiarów i obserwacji dynamicznych przebiegów w rdzeniu magnesowanym równocześnie napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

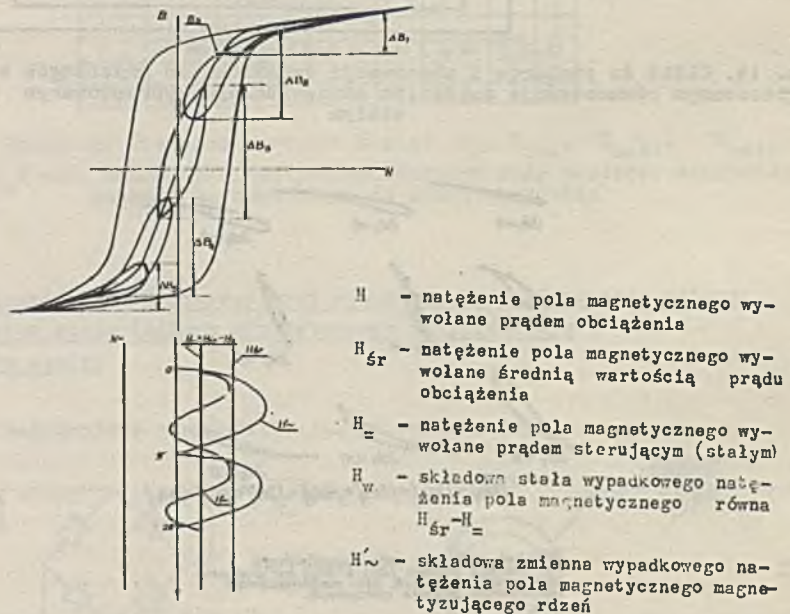


Kierunek natężenia pola magnetycznego wywołanego prądem $(J_{d1} + J_{d2})$ jest przeciwny do kierunku natężenia pola magnetycznego wywołanego prądem obciążenia.

Rys. 16. Kształt dynamicznych pętli histerezy rdzenia magnesowanego równocześnie napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

Obserwacja pętli histerezy wykazuje, że indukcja magnetyczna (ΔB) ze zmianą prądu sterującego ulega zmianie. Zmiany prądu sterującego powodują zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) i równocześnie zmiany średnich wielkości mierzonych napięć U_{ind} , U_p oraz wartości średniej składowej zmiennej napięcia U_o . Średnia wartość napięcia U_o lub średnia wartość prądu obciążenia I_{obc} , mierzona przyrządem magnetoelektrycznym, przy zmianie prądu sterującego, nie ulega zmianie. Miarą zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu są zmiany mierzonego napięcia U_p .

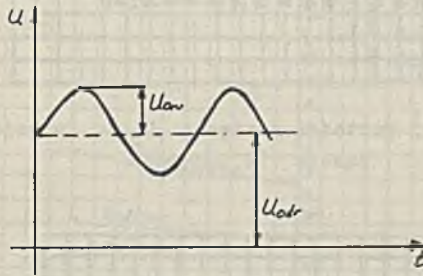
Przyjmując założenia analogiczne jak w punkcie 2, możemy określić kształt dynamicznych pętli histerezy w układzie współrzędnych: indukcja magnetyczna w rdzeniu - natężenie pola magnetycznego wypadkowego magnesującego rdzeń, w funkcji prądu sterującego. Przebiegi dynamicznych pętli histerezy oraz zmiany indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu, przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia polem stałym i napięciem sinusoidalnym wyprostowanym przedstawia rysunek 17. Górne i dolne wartości indukcji magnetycznej (ΔB) leżą na krzywej będącej miejscem geometrycznym wierzchołków rodziny dynamicznej pętli histerezy. W tym przypadku magnesowania, miejscem geometrycznym górnych i dolnych wartości indukcji magnetycznej (ΔB) jest krzywa B_3 (rys. 17). Przy danych parametrach obwodu, w zależności od wielkości napięcia zasilającego, przy prądzie sterującym równym zero,



Rys. 17. Wyznaczenie dynamicznych pętli histerezy rdzenia magnesowanego równocześnie napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

rdzeń będzie magnesowany mniej lub bardziej głęboko oraz ustali się większa lub mniejsza średnia wartość prądu obciążenia.

Indukcja magnetyczna (ΔB), w tym układzie magnesowania rdzenia, jest wywołana składową zmienną wypadkowego natężenia pola magnetycznego (H'_m) magnesującego rdzeń. Obserwacja zmian dynamicznych pętli histerzy, przy równoczesnym magnesowaniu rdzenia polem stałym i napięciem sinusoidalnym, przy czym pole stałe zmienia się w dowolnych granicach, pozwala stwierdzić, że rdzeń przy tym sposobie magnesowania stanowi element o zmiennej indukcji magnetycznej (ΔB), będącej funkcją pola sterującego. Na rysunku 18 przedstawiono przebieg napięcia na oporności obciążenia, obserwowanego w układzie wg rys. 15.



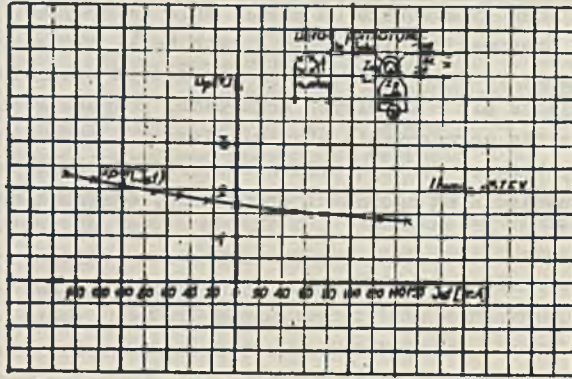
Rys. 18. Przebieg napięcia na oporności obciążenia w układzie magnesowania rdzenia napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

U_0 - amplituda składowej zmiennej, U_{0sr} - wartość średnia napięcia

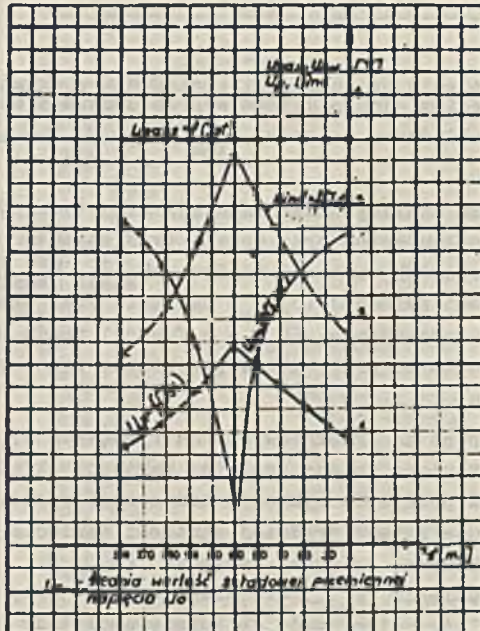
Dla przeprowadzenia analizy zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu w funkcji prądu sterującego oraz wpływu tych zmian na pracę układu zdjęto charakterystyki średnich wartości napięć: U_{zas1} , U_{zas2} , U_{ind} , U_p , średniej wartości składowej zmiennej (U_{0sr}) napięcia oraz średniej wartości napięcia na oporności obciążenia (U_{0sr}) w funkcji prądu sterującego. Dla oceny wpływu prostownika na pracę układu, wykonano pomiary zmian napięcia U_{zas1} oraz U_{zas2} .

Przebiegi tych napięć są przedstawione na rysunkach 19, 20 oraz 21. Na rysunku 20 są przedstawione zmiany średniej wartości składowej zmiennej napięcia (U_{0sr}). Na podstawie wykresów można stwierdzić, że zmiana prądu sterującego powoduje zmianę średniej wartości napięcia U_{ind} , U_p oraz średniej wartości składowej zmiennej napięcia (U_{0sr}).

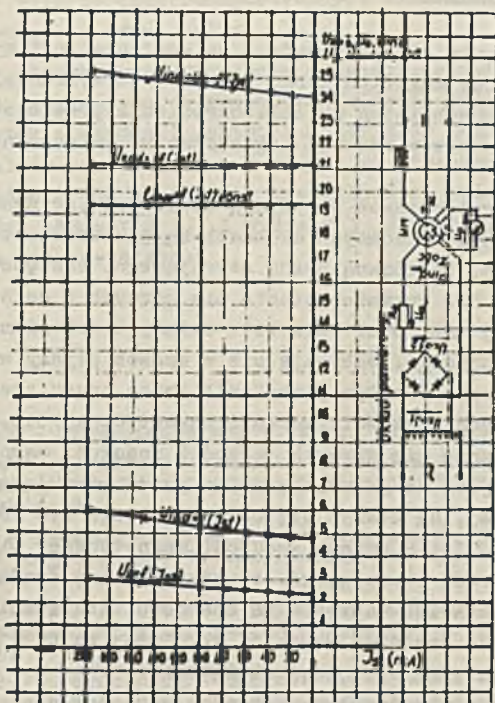
Średnia wartość napięcia (U_{0sr}) nie ulega zmianie przy zmianie prądu sterującego. Stąd należy wnioskować, że zmiany amplitudy składowej zmiennej napięcia ($U_{0\sim}$) oscylują wokół ustalonej wartości średniej (U_{0sr}) zależnej od napięcia zasilania oraz oporności czynnej obwodu i nie wpływają na wartość średnią napięcia (U_{0sr}).



Rys. 19. Przebieg średniej wartości napięcia U_p w funkcji prądu sterującego (I_{st})



Rys. 20. Przebiegi średnich wartości napięć U_{inad} , U_p , U_{sr} , U_{zas2} w układzie równoczesnego magnesowania rdzenia napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym



Rys. 21. Przebiegi średnich wartości napięć U_p , U_{ind} , $U_{o\text{sr}}$, $U_{za\text{ś}2}$ oraz $(U_{ind} + U_o)$ w układzie równoczesnego magnesowania rdzenia napięciem sinusoidalnym wyprostowanym i polem stałym

Suma algebraiczna średniej wartości napięcia U_{ind} i średniej wartości napięcia $U_{o\text{sr}}$ leży w całym zakresie zmian prądu sterującego powyżej średniej wartości napięcia zasilania ($U_{za\text{ś}2}$).

Zmiany średnich wartości składowej zmiennej napięcia U_o , średniej wartości napięcia U_{ind} oraz średniej wartości napięcia U_p przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego w zależności od napięcia zasilania mogą być różne. Przedstawiają to rysunki 20 i 21.

Przy zmianie prądu sterującego, w dowolnych granicach, przebieg napięcia U_o osiąga minimum i przy wzroście prądu sterującego w dowolnym kierunku napięcia U_o rośnie, dążąc asymptotycznie do wartości ustalonej.

Zmiany napięcia U_p są miarą zmian indukcji magnetycznej (ΔB) w rdzeniu. Przebieg napięcia U_p ze zmianą prądu sterującego osiąga maksimum i ze wzrostem prądu sterującego w dowolnym kierunku maleje, dążąc asymptotycznie do wartości ustalonej.

Przebieg napięcia U_{ind} posiada maksimum i ze zmianą prądu sterującego w dowolnym kierunku maleje, dążąc asymptotycznie do wartości ustalonej.

5. Uwagi końcowe i wnioski

Przedstawione badania laboratoryjne są kontynuacją fizykalnej metody badań pracy wzmacniaczy magnetycznych. Badania te wykraczają poza układy wzmacniaczy magnetycznych, mając na celu określenie prawidłowości przebiegów dynamicznych procesów w rdzeniu magnesowanym równocześnie dwoma polami.

Wyniki badań laboratoryjnych pozwalają stwierdzić, że dynamiczne procesy magnesowania rdzenia w badanych układach są jakościowo takie same.

W każdym z układów, ze zmianą prądu sterującego, następowała zmiana indukcji magnetycznej ΔB . Przemieszczanie się górnych i dolnych wartości indukcji magnetycznej ΔB oraz całkowite zmiany indukcji magnetycznej ΔB , ze zmianą prądu sterującego, odbywają się w sposób płynny w całym zakresie zmian prądu sterującego. W całym przedziale zmian prądu sterującego, przemieszczaniu się dolnych wartości indukcji magnetycznej ΔB , towarzyszy równoczesne przemieszczanie się górnych wartości indukcji magnetycznej ΔB . Zmiany ΔB przypadające na jednostkę zmian prądu sterującego w zależności od odcinka krzywej, na którym się odbywają, mogą być różne.

W układach wg rys. 1 i 8 zmiana indukcji magnetycznej ΔB w rdzeniu, spowodowana zmianą prądu sterującego, powoduje zmianę średniej wartości prądu obwodu obciążenia lub napięcia na oporności obciążenia oraz w układzie wg rys. 14 zmianę średniej wartości składowej zmiennej prądu obwodu obciążenia lub napięcia na oporności obciążenia.

W każdym z badanych układów suma średnich wartości napięć ($U_0 + U_{ind}$), w całym przedziale zmian prądu sterującego, jest większa od średniej wartości napięcia zasilającego:

$$U_0 + U_{ind} > U_{zas} \quad (4)$$

Na podstawie wykresów (rys. 4, 12, 13, 21) możemy stwierdzić, że różnica napięć:

$$U_{zas} - (U_0 + U_{ind}) = \Delta U, \quad (5)$$

w zależności od prądu sterującego może przyjmować inną wartość.

Wykonane badania i obserwacje upoważniają do postawienia następujących wniosków:

- zmiana indukcji magnetycznej ΔB , w funkcji prądu sterującego, występująca we wszystkich badanych układach jest cechą, która może posłużyć dla matematycznego opisu dynamicznego procesu magnesowania rdzenia równocześnie dwoma polami;
- poznanie zależności przebiegu $\Delta U = f(I_{st})$ oraz $\Delta U = f(\Delta B)$ pomoże w uściśleniu procesu projektowo-konstrukcyjnego przewidywania charaktery-

styk wejście - wyjście elektromagnetycznych elementów automatyki magnesowanych równocześnie dwoma polami.

Przewidywanie charakterystyk wejście - wyjście elektromagnetycznych elementów automatyki magnesowanych równocześnie dwoma polami oraz powiązanie tych charakterystyk z metodami kontroli materiałów magnetycznych używanych na te rdzenie należy uznać w obecnej chwili za niezadawalające. Wydaje się, że prowadzone badania dla określenia prawidłowości zmian wymienionych w artykule wielkości $\Delta B = f(I_{st})$ i $\Delta U = f(I_{st})$ mogą być przydatne dla dalszego rozeznania tych problemów.

LITERATURA

1. M.A. Rozenblat - Wzmacniacze magnetyczne. WNT Warszawa 1965.
2. M.A. Rozenblat - Magnitnyje elementy awtomatiki i wyčislitelnoj techniki. Izdatelstwo "Nauka". Główna Redakcja Fizyko-Matematycznej Literatury, Moskwa 1966.
3. R.W. Roberts - Present methods of core evaluation, grading and matching, Conference on Magnetic Amplifiers (Design and Application), Proceedings, Syracuse, 1956.
4. A. Góral - O aktualnym stanie i zadaniach fizycznej teorii nierezonansowych wzmacniaczy magnetycznych. Archiwum Automatyki i Telemekhaniki T. VIII, z. 4, 1963.
5. H. Kowalowski, H. Skupiński - Badanie właściwości dynamicznych materiałów magnetycznych na rdzenie samonasycalnych wzmacniaczy magnetycznych metodą Roberta. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Automatyka z. 19, 1971 r.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 3.V.1972 r.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧЕВАНИЯ МАГНИТНЫХ СРЕДЧНИКОВ

Резюме

В статье приведены результаты экспериментальных исследований динамических процессов намагничивания ферромагнитного сердечника, питаемого синусоидальным напряжением по схеме работы бросельного магнитного усилителя, одноконтурного самонасыщаемого магнитного усилителя, а также по схеме намагничивания сердечника постоянным током и синусоидальным выпрямленным двупериодным напряжением. Такой подбор схем был сделан с целью указания общих выводов о протекании динамических процессов намагничивания магнитных сердечников по разным схемам.

Данная работа есть продолжение метода физического толкования работы магнитных усилителей.

Более полное представление физических явлений процесса динамического намагничивания ферромагнитного сердечника по любой схеме работы, даст возможность в результате точнее предсказывать свойства устройств реализованных на основе магнитных элементов, а также упрости конструкторские и проектные работы.

DYNAMIC PROCESSES OF THE CORES MAGNETIZING

S u m m a r y

In the article are shown the test results of magnetizing the ferro-magnetic cores of choke - coupled transtuctor amplifiers and half - wave self - saturating transductoer amplifiers supplied by sinusoidal voltage and by direct current and double - wave rectified sinusoidal voltage. The above - mentioned circuits of magnetic amplifiers are basic and thus the conclusions may be generalised for a lot of circuits.

The presnt work is a continuation in a physical method's circumscription of the transductor amplifiers operation.

But the subject is wider: the article concerns not only with the transductor amplifiers but shows a number of features common for the dynamic processes of the cores magnetizing in different circuits.

The wider konwledge about these phenomena will enable as a consequence more precise providing for properties of the fascilities based on the magnetic elements and will simplify the designs and compositions work.