

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	6
1. WSTĘP	9
2. MATERIAŁY I OBWODY MAGNETYCZNE	11
2.1. Pętle histerezy i straty mocy w rdzeniu	11
2.2. Charakterystyki magnesowania	14
2.3. Materiały magnetyczne	17
2.3.1. Blachy krzemowe anizotropowe.....	19
2.3.2. Blachy niklowo-żelazowe (permaloje).....	20
2.3.3. Taśmy amorficzne i nanokrystaliczne	21
2.3.4. Materiały obwodów składanych.....	25
2.4. Rodzaje obwodów magnetycznych.....	29
2.5. Obliczanie obwodów magnetycznych	33
2.5.1. Obliczanie przekładników napięciowych	33
2.5.2. Obliczanie przekładników prądowych.....	43
3. ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO PRZEKŁADNIKA	47
3.1. Podstawowe równania i schemat zastępczy.....	47
3.2. Strumień główny i strumienie rozproszenia.....	49
3.3. Podwójne rozproszenie magnetyczne	53
3.4. Rozkłady pola magnetycznego w rdzeniu	57
3.4.1. Przekładnik prądowy	57
3.4.2. Przekładnik napięciowy.....	63
3.5. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego	67
4. ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO ROZPROSZENIA	71
4.1. Metody obliczania pola magnetycznego rozproszenia	71
4.1.1. Metody analityczne.....	71
4.1.2. Metody numeryczne	72
4.2. Modele matematyczne	74
4.2.1. Przekładnik prądowy ramkowy	74
4.2.2. Przekładnik prądowy toroidalny	78
4.3. Wyniki obliczeń dwuwymiarowego pola rozproszenia.....	81
4.3.1. Przekładniki o rdzeniu ramkowym.....	81
4.3.2. Przekładniki o rdzeniu toroidalnym	86
4.4. Obliczanie trójwymiarowego pola rozproszenia	87
4.4.1. Obliczanie metodą różnic skończonych	88
4.4.2. Obliczanie metodą równań całkowych.....	92

4.4.3. Przykłady obliczeń pola magnetycznego przekładników prądowych	97
4.5. Wpływ zewnętrznych pól magnetycznych oraz elementów stalowych na rozkład pola magnetycznego rozproszenia.....	100
4.5.1. Wpływ obcego toru prądowego	100
4.5.2. Wpływ ściany stalowej	103
4.6. Reaktancja rozproszenia uzwojenia wtórnego.....	108
LITERATURA.....	115
SKOROWIDZ.....	119

PRZEDMOWA

Tematyka monografii dotyczy obecnie aktualnej dziedziny wspomaganego komputerowo projektowania i optymalizacji konstrukcji urządzeń elektrycznych. W monografii zawarto zagadnienia dotyczące teorii, obliczania oraz konstrukcji obwodów magnetycznych przekładników prądowych, napięciowych i przekładników kombinowanych, z uwzględnieniem najnowszych prac dotyczących zarówno metod obwodowych jak i polowych analizy przekładników. Szczegółowo omówiono analizę rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu przekładnika i pola magnetycznego rozproszenia oraz podano wyniki obliczeń i pomiarów reaktancji rozproszenia różnych konstrukcji przekładników. Do obliczeń wykorzystano metody numeryczne.

Podano również przykłady wpływu pola magnetycznego od obcego toru prądowego oraz elementów stalowych na rozkład pola magnetycznego rozproszenia i wartość reaktancji rozproszenia uzwojenia wtórnego przekładnika prądowego.

Monografia jest przeznaczona dla inżynierów konstruktorów aparatów elektrycznych i słuchaczy Studium Doktoranckiego. Pewne fragmenty pracy mogą być wykorzystywane w procesie dydaktycznym na studiach magisterskich (II stopnia).

Łódź, styczeń 2007 rok

Ryszard Nowicz

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A	– magnetyczny potencjał wektorowy (Wb/m),
B	– wektor indukcji magnetycznej (T),
B	– indukcja magnetyczna (T),
B_m	– amplituda indukcji sinusoidalnej,
B_{max}	– maksymalna (szczytowa) wartość indukcji,
B_r	– indukcja szczątkowa,
B_s	– indukcja nasycenia,
b_1, b_2	– długość uzwojenia pierwotnego, wtórnego (m),
b_r	– zastępcza długość uzwojenia,
d	– grubość blachy; średnica uzwojenia (m),
E	– wektor natężenia pola elektrycznego (V/m)
e, E, E_m	– wartość chwilowa, skuteczna, maksymalna napięcia siły elektromotorycznej (V),
f	– częstotliwość (Hz),
g	– gęstość materiału (kg/m^3),
g_p	– szerokość zastępczej szczeliny powietrznej (m),
H	– wektor natężenia pola magnetycznego (A/m),
H	– natężenie pola magnetycznego,
H_m	– amplituda natężenia pola magnetycznego sinusoidalnego (A/m),
I	– prąd zespolony,
I_1, I_2, I_0	– wartość skuteczna prądu pierwotnego, wtórnego, jałowego (A),
I_μ, I_R	– wartość skuteczna składowej biernej, czynnej prądu jałowego,
i_1, i_2, i_0	– wartość chwilowa prądu pierwotnego, wtórnego, jałowego,
J	– wektor gęstości prądu elektrycznego (A/m^2),
j	– gęstość prądu (A/m^2),
k_B	– współczynnik kształtu krzywej indukcji,
k_D	– współczynnik korekcyjny uzwojeń,
k_{Fe}	– współczynnik wypełnienia rdzenia,
k_p, k_q	– współczynnik strat dodatkowych czynnych, biernych,
k_t	– współczynnik napięciowy,
L	– indukcyjność cewki, odbiornika (H),
L_{r1}, L_{r2}	– indukcyjność rozproszenia uzwojenia pierwotnego, wtórnego
L_μ	– indukcyjność magnesowania
l	– długość (m),
l_{Fe}	– długość drogi strumienia w rdzeniu,

M	– indukcyjność wzajemna (H),
M_r	– indukcyjność wzajemna rozproszenia,
m_{Fe}	– masa rdzenia (kg),
n	– wskaźnik wartości znamionowej,
P	– moc czynna (W),
P_{Fe}	– straty mocy w rdzeniu (W),
p_{Fe}	– jednostkowe straty czynne (stratność blachy) (W/kg),
Q	– moc bierna (var),
Q_{Fe}	– moc bierna magnesująca rdzeń,
q_{Fe}	– jednostkowe straty bierne (var/kg),
R	– rezystancja odbiornika (Ω),
R_1, R_2	– rezystancja uzwojenia pierwotnego, wtórnego,
R_{Fe}	– rezystancja odwzorowująca straty czynne w rdzeniu,
R_μ	– opór magnetyczny (reluktancja),
r	– współrzędna biegunowa,
S	– moc pozorna odbiornika ($V \cdot A$),
S_{Fe}	– przekrój rdzenia (m^2),
s_{Fe}	– jednostkowe straty mocy pozornej ($V \cdot A / kg$),
T	– okres (s),
t	– czas (s),
\underline{U}	– napięcie zespolone,
U_1, U_2	– wartość skuteczna napięcia pierwotnego, wtórnego (V),
U_μ	– wartość skuteczna napięcia na impedancji magnesowania,
u_1, u_2	– wartość chwilowa napięcia pierwotnego, wtórnego,
V	– objętość,
X_1, X_2	– reaktancja rozproszenia uzwojenia pierwotnego, wtórnego (Ω),
\underline{Z}	– impedancja zespolona,
Z	– impedancja (moduł) odbiornika (Ω),
Z_1, Z_2	– impedancja uzwojenia pierwotnego, wtórnego,
Z_C	– impedancja całkowita (obydwu uzwojeń) przekładnika,
Z_μ	– impedancja gałęzi magnesowania,
z_1, z_2	– liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, wtórnego,
α	– kąt strat materiału rdzenia,
β	– kąt fazowy (argument impedancji) obciążenia obwodu wtórnego,
γ	– konduktywność (S/m),
Δ	– klasa dokładności,
Δi	– błąd prądowy (%),
Δu	– błąd napięciowy (%),
δ	– błąd kątowy (min),
$\hat{\epsilon}$	– chwilowy błąd szczytowy,
Θ	– siła magnetomotoryczna (przepływ) (A); temperatura (K)

ϑ	– przekładnia,
λ_s	– współczynnik magnetostrykcji,
μ_0	– przenikalność próżni (powietrza) (H/m)
μ_{\max}	– przenikalność maksymalna
μ_r	– przenikalność względna
ρ	– rezystywność ($\Omega \cdot m$); masa właściwa (kg/m^3),
ϕ, ϕ_{\max}	– wartość chwilowa, maksymalna strumienia magnetycznego (Wb),
ϕ_1, ϕ_2	– strumień uzwojenia pierwotnego, wtórnego,
ϕ_0	– strumień główny,
ϕ_r	– strumień rozproszenia,
φ	– kąt przesunięcia fazowego; współrzędna biegunowa,
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_C$	– kąt przesunięcia fazowego impedancji Z_1, Z_2, Z_C ,
Ψ	– strumień skojarzony,
ω	– pulsacja sieci (rad/s).

1. WSTĘP

Jednym z ważniejszych zadań energetyki i elektryfikacji jest zapewnienie niezawodności działania sieci i systemów elektroenergetycznych przy jednoczesnym uwzględnieniu czynnika ekonomiczności. Urządzenia rozdzielcze stacji elektroenergetycznych są węzłami obwodów sieci elektrycznych i w znacznym stopniu wyznaczają niezawodność i efektywność pracy energosystemu.

Przekładniki prądowe i napięciowe, nazywane także transformatorami prądu lub napięcia stanowią istotny składnik urządzeń rozdzielczych. Służą one zarówno do pośredniego pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych (prądu, napięcia, mocy, częstotliwości, współczynnika mocy), a więc do oceny jakości energii elektrycznej, ale także są głównym źródłem sygnałów w układach automatyki elektroenergetycznej. W znacznym stopniu przyczyniają się do zapewnienia niezawodności i bezpiecznej pracy innych urządzeń elektrycznych. Przekładniki klasyczne (indukcyjne) często spełniają rolę przetwornika pierwotnego w przekładnikach niekonwencjonalnych pracujących w szerokim zakresie zmian wielkości pierwotnej (prądu, napięcia).

Zwiększenie znamionowych wartości napięć i prądów w energosystemach prowadzi do wzrostu wymagań w stosunku do przekładników prądowych, napięciowych oraz, coraz częściej stosowanych w ostatnich latach, przekładników kombinowanych. Zwiększeniu uległo również pasmo częstotliwości, w którym pracują przekładniki energetyczne (szczególnie prądowe).

Wiele zagadnień elektromagnetycznych, omówionych w pracy, jest wspólnych dla indukcyjnych przekładników napięciowych i prądowych. Dlatego we wszystkich przypadkach, w których w monografii jest użyta nazwa przekładnik należy rozumieć, że dana kwestia dotyczy obydwu rodzajów przekładników a także obydwu członów przekładnika kombinowanego. Natomiast wówczas, gdy omawiane zagadnienie dotyczy tylko jednego z przekładników, jest to wyszczególnione.

Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu przekładnika wpływa zarówno na wartość siły elektromotorycznej, straty w rdzeniu i moc magnesującą czyli również na jego błędy przekładni i kątowe. W przekładniku prądowym przewidzianym do pracy przy podwyższonych częstotliwościach (rzędu kilkuset kHz) rozkłady indukcji w rdzeniu i wyznaczenie lokalnych obszarów nasycenia ma znaczenie ogromne. Zwiększone miejscowe straty cieplne występujące w tych warunkach, w niewłaściwej konstrukcji, prowadzą do olbrzymiego wzrostu temperatury rdzenia i uszkodzenia przekładnika (zwęglenie obudowy i spalanie izolacji uzwojeń).

Wyznaczenie pola magnetycznego rozproszenia w różnych stanach pracy jest niezbędne w celu obliczenia sił elektrodynamicznych uzwojenia przekładnika prądowego czyli jego wytrzymałości zwarciowej. Analiza pola magnetycznego umożliwia również obliczenie reaktancji rozproszenia uzwojeń przekładnika. Reaktancja rozproszenia uzwojenia wtórnego X_2 przekładnika prądowego oraz obydwie reaktancje rozproszenia X_1 i X_2 przekładnika napięciowego mają często wartość porównywalną z wartością reaktancji indukcyjnej odbiornika i wywierają duży wpływ na błędy przekładników.

Określenie tych wielkości na etapie obliczeń projektowych przekładnika, niezależnie od zastosowanej metody projektowania, pozwala na dokładniejsze obliczenie parametrów konstrukcyjnych i jednocześnie ograniczenie kosztownych badań laboratoryjnych. Przedstawione w pracy metody teorii pola umożliwiają przeprowadzenie analizy pola magnetycznego i wyznaczenie odpowiednich wielkości całkowych.

2. MATERIAŁY I OBWODY MAGNETYCZNE

2.1. Pętle histerezy i straty mocy w rdzeniu

Pętlę statyczną otrzymujemy przy magnesowaniu materiałów magnetycznych w polach stałych. Jej powierzchnia jest proporcjonalna do strat na histerezę. Dla typowych blach magnetycznych (tzn. nie dla cienkich taśm) pętla statyczna praktycznie nie zależy od grubości blachy. Zwiększanie natężenia pola magnetycznego powoduje wzrost powierzchni statycznych pętli histerezy, a przy pewnej wartości natężenia pola powstaje skrajna (graniczna) pętla histerezy. Dalsze zwiększanie natężenia pola zwiększa tylko jej część bezhisterezową (w obszarze nasycenia), a powierzchnia wyznaczająca straty czynne pozostaje praktycznie stała.

Dynamiczna pętla histerezy powstaje przy magnesowaniu próbki w polu przemiennym. Pętla ta obrazuje straty łączne – na histerezę i od prądów wirowych. Kształt dynamicznej pętli zależy nie tylko od rodzaju materiału i technologii jego obróbki, ale również od kształtu i rozmiarów próbki, temperatury a także kształtu krzywej indukcji i częstotliwości.

W polach wolnozmiennych, np. o częstotliwości od 0,01 Hz do 10 Hz dla blach elektrotechnicznych, można wyznaczyć taką dynamiczną pętlę, której powierzchnia będzie praktycznie równa powierzchni statycznej pętli histerezy. Tak wyznaczoną pętlę nazywa się quasi-statyczną. Warunki jej wyznaczania, tzn. przede wszystkim częstotliwość zmian pola magnetycznego, zależą głównie od rodzaju materiału ferromagnetycznego.

Największe różnice pomiędzy statycznymi i dynamicznymi pętlami histerezy dla określonej częstotliwości pola przemiennego występują dla wysokogatunkowych stali anizotropowych. Przykładowo, dla takiej blachy o grubości 0,28 mm, przy indukcji $B_m = 1\text{T}$ stratność wyznaczona na podstawie pętli statycznej czyli stratność histerezowa wynosi ok. 0,2 W/kg, natomiast z pętli dynamicznej przy 50 Hz – 0,38 W/kg.

Jednostkową moc pozorną potrzebną na przemagnesowanie określonej próbki (podawaną najczęściej w VA/kg), przy sinusoidalnej indukcji opisuje wzór:

$$s_{Fe} = CB_m Hf \quad (2.1)$$

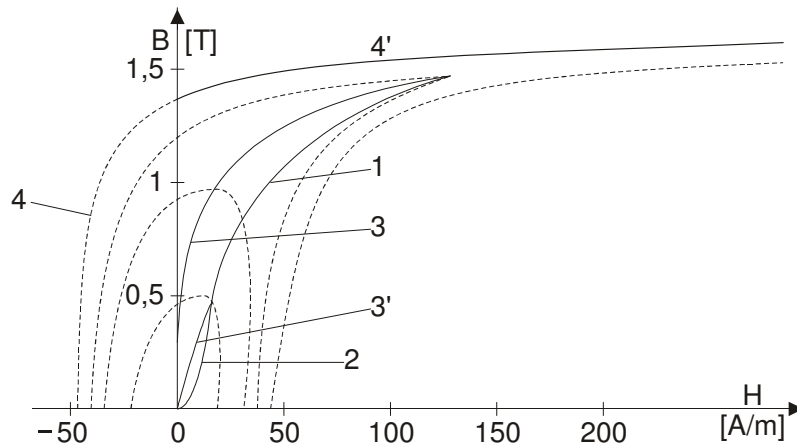
gdzie: B_m – amplituda indukcji,
H – wartość skuteczna natężenia pola,
f – częstotliwość,
C – stała.

Jednostkowa moc strat od prądów wirowych (podawana najczęściej w W/kg), przy założeniu równomiernego rozkładu indukcji w przekroju blachy oraz zgodności kierunków wektorów indukcji i natężenia pola, w warunkach bezskładowej aperiodycznej prądu, może być wyrażona:

$$p_w = \frac{\pi^2}{6g\rho} (B_m f d k_B)^2 \quad (2.2)$$

gdzie: g – gęstość materiału,
 ρ – rezystywność blachy,
 d – grubość blachy,
 k_B – współczynnik kształtu krzywej indukcji.

W praktyce w katalogach materiałów magnetycznych, podawane są jednostkowe straty czynne jako stratność blachy p_{Fe} oraz jednostkowa moc pozorna S_{Fe} .



Rys. 2.1. Pętle histerezy (linie przerywane) i charakterystyki magnesowania (linie ciągłe) dla stali walcowanej na zimno, wyznaczone przy prądzie przemiennym 50 Hz (krzywe zostały opisane w p. 2.2)

1 – początkowa krzywa magnesowania, 2 – amplitudowa dynamiczna krzywa magnesowania,
 3' – średnia krzywa magnesowania przy małej indukcji, 3 – średnia krzywa magnesowania przy dużej indukcji, 4' – średnia krzywa przy prądzie ze składową aperiodyczną,
 4 – graniczna pętla histerezy

W rzeczywistości proces magnesowania najczęściej nie przebiega w warunkach równomiernego rozkładu indukcji. Prądy wirowe powodują niejednorodny rozkład indukcji magnetycznej w przekroju próbki. Z powodu rozmagnesowującego działania tych prądów indukcja wewnątrz (w osi) próbki zmniejsza się i opóźnia w fazie. Największa wartość indukcji jest na powierzchni, czyli występuje *efekt wypierania*.

Powstają wówczas *straty dodatkowe*, (anomalne) które zwiększają straty wypadkowe od prądów wirowych w stosunku do wyliczonych według zależności (2.2). Wartość tych strat zależy od rodzaju blachy (struktury ziaren) jej grubości i zawartości krzemu oraz indukcji magnetycznej i częstotliwości. Straty te mogą wynosić od 10% do 25% a niekiedy aż do 50% strat wypadkowych. Straty te można w zasadzie wyznaczyć tylko na podstawie pomiaru ogólnych strat w rdzeniu.

Łączne straty w żelazie są sumą strat na histerezę i od prądów wirowych oraz lepkości magnetycznej i strat dodatkowych. Niekiedy w rozważaniach pomija się lepkość magnetyczną. Wielkości mające wpływ na straty w gotowym obwodzie magnetycznym przekładnika pracującego w sieci to: amplituda i kształt krzywej indukcji oraz częstotliwość.

Dokładna zależność strat w żelazie od tych wielkości jest złożona i w literaturze jest podawana w różnej postaci. W przybliżeniu można przyjąć, że opisuje ją wzór [25, 47]:

$$P_{Fe} = C_1 B_m^{1,6} f + C_2 f^2 B_m^2 + C_3 (B_m f)^{1,5} \quad (2.3)$$

gdzie C_1, C_2, C_3 – stałe.

Jeżeli wyznaczona jest stratność blachy p_{Fe} dla ustalonych parametrów odniesienia, tzn. częstotliwości f_o , amplitudy indukcji B_{mo} i współczynnika kształtu krzywej indukcji $k_B = 1,11$, wówczas dla obliczenia strat przy innej częstotliwości f i odkształconym przebiegu B można posługiwać się zależnością

$$P_{Fe} = p_{Fe} m_{Fe} \left(\frac{f}{f_o} \right)^{1,5} \left(\frac{B_m}{B_{mo}} \right)^2 \left(\frac{k_B}{1,11} \right)^2 \quad (2.4)$$

Współczynniki i wykładniki potęg występujące we wzorach określających straty mocy są wyznaczane eksperymentalnie dla danego materiału i obowiązują w pewnych zakresach zmian poszczególnych wielkości.

Przy wyznaczaniu pętli histerezy lub charakterystyki magnesowania duże znaczenie ma kształt krzywej indukcji magnetycznej lub krzywej natężenia pola magnetycznego. Charakterystyki magnesowania można wyznaczać albo przy sinusoidalnym napięciu (indukcji) w postaci $B_m = f(H_{max})$ lub przy sinusoidalnym prądzie (natężeniu pola) w postaci $B_{max} = f(H_m)$. Sinusoidalne napięcie wywołuje prąd symetryczny odkształcony harmonicznymi nieparzystymi (głównie trzecią), natomiast magnesowanie sinusoidalnym prądem – przeciwnie – spowoduje odkształcenie krzywej napięcia. Wzrasta wtedy wartość współczynnika kształtu krzywej indukcji, zwiększa się zawartość wyższych harmonicznymi i wzrastają straty w żelazie (wzór 2.4). Pętla histerezy przy sinusoidalnym prądzie (dla blachy walcowanej na zimno) może być np. 1,5 razy szersza niż przy sinusoidalnym napięciu.

W przypadku, gdy w obwodzie magnetycznym jest indukcja o przebiegu praktycznie sinusoidalnym i częstotliwości sieciowej moc czynną, traconą w rdzeniu, przy indukcji B_m , można określić według wzoru

$$P_{Fe} = p_{Fe} k_p m_{Fe} \left(\frac{B_m}{B_{m0}} \right)^2 \quad (2.5)$$

gdzie B_{m0} jest amplitudą indukcji przy której wyznaczono stratność p_{Fe} a k_p jest współczynnikiem strat dodatkowych. Współczynnik ten najczęściej wynosi około (1,3...1,4). Podobnie można wyznaczyć moc bierną magnesującą Q_{Fe} z jednostkowego poboru mocy biernej q_{Fe} według zależności

$$Q_{Fe} = q_{Fe} k_q m_{Fe} \left(\frac{B_m}{B_{m0}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Współczynnik k_q , osiąga wartości większe niż k_p . Moc bierna magnesująca, przy kierunku magnesowania niekorzystnym w stosunku do kierunku walcowania, wzrasta wielokrotnie a współczynnik k_q może przybierać wartość około (2...3) lub większą. Wartości współczynników k_p oraz k_q zależą od sposobu zaplatania rdzenia w narożach (również w węzłach dla przekładników trójfazowych), udziału naroży (i węzłów) w ogólnej masie rdzenia oraz czynników technologicznych (cięcie blach, wyżarzanie). Współczynniki te są wyznaczane eksperymentalnie z wielu pomiarów.

Współczesne materiały magnetyczne anizotropowe (np. blachy ARMCO) charakteryzują się tym, że dla małych indukcji (poniżej ok. 0,2 T) przy $f = 50$ Hz, straty czynne P_{Fe} są mniejsze od mocy biernej Q_{Fe} , a przy wzroście indukcji występuje relacja przeciwna i dopiero przy indukcjach dużych wartości mocy biernej znacznie przewyższają straty mocy czynnej.

Firmy produkujące materiały magnetyczne podają krzywe strat mocy czynnej p_{Fe} [W/kg] oraz pobieranej mocy pozornej s_{Fe} [VA/kg] a niekiedy również mocy biernej q_{Fe} [var/kg] niezbędnej na magnesowanie obwodu magnetycznego. Na ich podstawie można określić składowe prądu jałowego I_0 , kąt strat α materiału rdzenia oraz błędy przekładnika. Wielkości te są jednak wyznaczane w aparacie Epsteina (próbki wycięte w kierunku walcowania i wyżarzone) albo dotyczą próbki o kształcie toroidalnym i dla zastosowanego w przekładniku innego kształtu obwodu magnetycznego, parametry te będą miały inne wartości.

2.2. Charakterystyki magnesowania

W katalogach blach wykonanych ze stali elektrotechnicznej podaje się krzywe magnesowania; *podstawową* lub *komutacyjną* (tzn. wyznaczoną przy prądzie stałym), rozumiane jako miejsca geometryczne wierzchołków dyna-

micznych, quasi-statycznych lub statycznych, symetrycznych pętli histerezy. Dla stali walcowanej na zimno, przy średnich polach przemiennych ($B_m < 1T$), maksymalna indukcja nie odpowiada maksymalnej wartości natężenia pola, a więc występuje między nimi przesunięcie fazowe. To przesunięcie dotyczy tylko pętli dynamicznych. W pętli statycznej występuje zawsze charakterystyczny spiczasty wierzchołek. Magnesowanie przy prądzie przemiennym odbywa się wg dynamicznych pętli, których powierzchnia jest proporcjonalna do łącznych strat w stali w ciągu jednego okresu. Natężenie pola dynamicznej amplitudowej krzywej magnesowania dla tej stali jest około (40...50)% większe od natężenia pola w podstawowej krzywej przy prądzie stałym dla stałej wartości indukcji. Przy indukcjach maksymalnych powyżej 1 T różnica ta zmniejsza się.

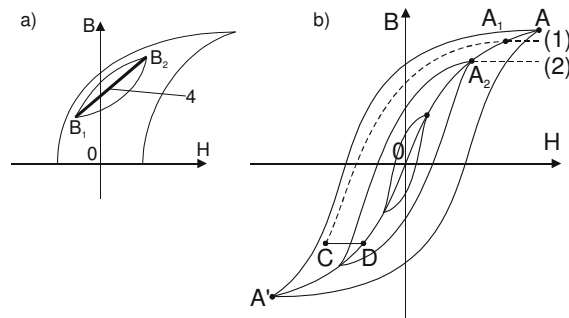
Dla stali walcowanej na gorąco dynamiczna krzywa magnesowania leży nieznacznie niżej od charakterystyki podstawowej zdjętej przy prądzie stałym tzn. krzywej komutacyjnej.

Do obliczenia parametrów pola magnetycznego należy wykorzystywać dynamiczne pętle histerezy, wyznaczone nie dla danego materiału ferromagnetycznego (próbki) ale dla rzeczywistego rdzenia w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków jego pracy. Jeżeli magnesowanie rdzenia w pewnym, nawet niewielkim przedziale czasowym występuje w obszarze silnego nasycenia, względna szerokość pętli histerezy jest bardzo mała i obliczenia można wykonywać nie według pętli a jednoznacznej krzywej magnesowania. Ważne jest również wówczas ustalenie warunków początkowych wynikających z określonej indukcji resztkowej B_r .

Dostatecznie dokładne obliczenia można na ogół wykonać pomijając straty w rdzeniu i uwzględniając tylko jednoznaczną krzywą magnesowania. Potwierdzeniem tego założenia są dynamiczne pętle wyznaczone przy częstotliwości 50 Hz dla rdzeni z blach izotropowych i anizotropowych przekładników prądowych [41]. Pętla blachy izotropowej przy natężeniach pola $H_{max} \geq 1200$ A/m jest praktycznie jednoznaczną zależnością $B_m = f(H_{max})$. Dla blachy anizotropowej pętlę dynamiczną w postaci pojedynczej krzywej otrzymuje się już przy mniejszych amplitudach natężenia pola.

Kształt pętli histerezy zależy od konstrukcji przekładnika, np. dla konstrukcji o rdzeniu prostokątnym z blachy izotropowej z uzwojeniem wtórnym umieszczonym na jednej kolumnie, pętlę dynamiczną można praktycznie traktować jako pojedynczą krzywą magnesowania dopiero dla natężeń pola H_{max} powyżej 5000 A/m. Jest to spowodowane niejednorodnością pola magnetycznego w rdzeniu tej konstrukcji.

Straty w stali należy uwzględniać przy obliczaniu wartości szczytowej siły elektromotorycznej przekładnika prądowego z otwartym obwodem wtórnym lub przy pracy przekładnika z prądem pierwotnym o stromych zboczach (np. o przebiegu prostokątnym).



Rys. 2.2. Średnia krzywa $B = f(H)$: a) w ustalonym niesymetrycznym cyklu magnesowania, b) pętle histerezy odwzorowujące początkowe magnesowanie

Jeżeli do określenia wartości chwilowych prądu lub napięcia zamiast pętli histerezy będzie stosowana *średnia krzywa magnesowania* to krzywą taką wyznacza się obliczając średnie wartości z minimalnej i maksymalnej wartości indukcji odpowiadających wybranemu zakresowi pracy z częściowych pętli histerezy (rysunki 2.1. i 2.2a). Średnia krzywa 3 (rys. 2.1) wyznaczona dla dużych indukcji przechodzi znacznie wyżej niż średnia krzywa dla indukcji małych. Dla bardzo dużych indukcji (przy częściowej pracy w zakresie nasycenia) wszystkie krzywe magnesowania i pętle histerezy mają przebiegi zbliżone.

Dla magnesowania ze stałą stałą i jednoczesnym uwzględnieniem indukcji resztkowej do obliczeń stosujemy średnie krzywe magnesowania, obliczone ze *średnich, niesymetrycznych częściowych* pętli histerezy. Wartości minimalne i maksymalne natężenia pola i indukcji wynikają wówczas z określonego zakresu pracy (rys. 2.2a). Przy dużej stałej stałej, do obliczeń można przyjąć średnią krzywą magnesowania (krzywa 4' – rys. 2.1).

W przypadku magnesowania w zakresie nasycenia, średnia krzywa pokrywa się praktycznie z osią rzędnych, najczęściej w zakresie indukcji do ok. 0,7...1,2 T, przebiegając dalej po opadającej gałęzi pętli histerezy.

W projektowaniu obwodu magnetycznego przekładnika zachodzi potrzeba odtworzenia jego rzeczywistego przemagnesowania wynikającego z istnienia prądów wirowych i zjawiska wypierania strumienia. W wyniku nierównomiernego rozkładu strumienia w rdzeniu (p. 3.4) poszczególne blachy rdzenia są magnesowane według różnych pętli histerezy. Uwzględnienie tego zjawiska w obliczeniach numerycznych jest możliwe przez wyznaczenie przestrzennie czasowego rozkładu pola elektromagnetycznego w stanie quasi-ustalonym [51]. Dla typowych blach magnetycznych można przyjąć, że stan taki występuje już po czasie odpowiadającym około 2 - 3 okresom zmiennego pola.

Jeżeli w chwili $t = 0$, obwód magnetyczny znajduje się w stanie rozmagnesowania (p. 0 – rys. 2.2b), to magnesowanie przebiega według charakterystyki pierwotnej (np. do p. A_1). Następnie odbywa się ono zgodnie z opadającą częścią pętli histerezy (np. do punktu C). Zakładając, że kolejny etap magnesowania

przebiega wg rosnącej części pętli histerezy, w wyniku iteracyjnego działania przechodzimy do punktu D, w którym indukcja jest taka, jak w p. C. Powtarzając wielokrotnie przebieg magnesowania, otrzymuje się stan quasi-ustalony. Stosowane do obliczeń krzywe magnesowania (1), (2) (rys. 2.2b), należy wyznaczyć eksperymentalnie dla określonego materiału magnetycznego i zapisać w rejestrze programu obliczeniowego.

W obecnie stosowanych, profesjonalnych programach obliczeniowych wykorzystuje się również inne sposoby uwzględniające zjawisko histerezy magnetycznej.

2.3. Materiały magnetyczne

Oceniając przydatność materiałów magnetycznych stosowanych na rdzenie przekładników należy brać pod uwagę podstawowe parametry materiałów, takie jak: przenikalność magnetyczna μ i stratność p_{Fe} w określonym zakresie zmian indukcji i dla określonej częstotliwości lub pasma częstotliwości, charakteryzujące normalne warunki pracy przekładnika a także indukcję nasycenia B_s istotną zarówno dla pracy normalnej jak i w stanach przejściowych. Ważna jest też znajomość współczynnika magnetostrykcji λ_s , którego wartość określa wrażliwość materiałów magnetycznych na odkształcenia mechaniczne. Zjawisko to zmienia parametry magnetyczne rdzenia (np. stratność), i powoduje uciążliwy przydźwięk w czasie pracy przekładnika. Aby temu przeciwdziałać należy w procesie projektowania przewidywać odpowiednią konstrukcję uzwojeń a szczególnie rdzenia.

Do oceny materiałów magnetycznych wygodnie jest posługiwać się średnią przenikalnością magnetyczną obliczoną jako stosunek przyrostów indukcji do natężenia pola w części roboczej charakterystyki magnesowania, tzn. najczęściej na jego prostoliniowym odcinku. Z punktu widzenia technologii wykonywania rdzeni należy również uwzględnić możliwości wykrawania kształtek oraz skutki pogorszenia ich właściwości w wyniku tej operacji.

W warunkach znamionowych, w rdzeniach przekładników prądowych pomiarowych indukcja magnetyczna zazwyczaj zawarta jest w przedziale (0,1..0,5)T. W obwodach magnetycznych przekładników prądowych zabezpieczeniowych znamionowa indukcja ma wartość mniejszą i może wynosić poniżej 0,1T. Jej wartość zależy od rodzaju materiału magnetycznego (indukcji nasycenia) i przede wszystkim od wartości współczynnika granicznej dokładności ALF. W warunkach przetężeniowych, gdy prąd pierwotny $I_1 = (10..15)I_{1zn}$, proporcjonalnie wzrasta indukcja i wówczas wynosi np. $B_{mp} = (1..1,5)T$. Jeżeli przekładnik prądowy znajdzie się w warunkach zwarciovych, prądy pierwotne mogą osiągać

wartość np. $100I_{1zn}$, ale już przy $I_1 \approx 20I_{1zn}$ indukcja magnetyczna w rdzeniu z blachy anizotropowej osiągnie wartość ok. 2T i rdzeń wchodzi w zakres nasycenia.

Przekładnik napięciowy pomiarowy, np. dwubiegunowy, pracujący w warunkach znamionowych lub do nich zbliżonych – tzn. wówczas, gdy napięcie wynosi $(0,8...1,2)U_n$ o częstotliwości sieciowej i obciążenie jest znamionowe – charakteryzuje się indukcją w rdzeniu przeciętnie o wartości $(0,8...1,2)T$. Dla przekładnika napięciowego zabezpieczeniowego normalny zakres zmian napięcia wynosi $(0,05...k_t)U_n$, co powoduje, że amplituda indukcji w rdzeniu zmienia się w odpowiednio szerszym zakresie i obejmuje również słabe pola magnetyczne, np. 0,05T.

Znamionową częstotliwością pracy elektroenergetycznych przekładników prądowych i napięciowych jest częstotliwość sieciowa. Jednak obecnie coraz częściej pojawia się konieczność pomiaru prądu lub napięcia (o dużych wartościach) w obwodach przy podwyższonych częstotliwościach. Częstotliwości te dla przekładników napięciowych, ze względu na zjawiska rezonansowe [33], nie przekraczają wartości kilku kHz, natomiast jeśli chodzi o przekładniki prądowe, to istnieje potrzeba zastosowania ich w obwodach o częstotliwościach kilkudziesięciu kHz lub nawet kilkuset kHz [32, 34].

Obecnie na rdzeniu przekładników elektroenergetycznych pracujących przy częstotliwości sieciowej stosuje się zasadniczo stale krzemowe anizotropowe (orientowane). Najczęściej blachy tego rodzaju mają grubość 0,23 mm, 0,28 mm i 0,35 mm o zawartości krzemu ok. 3%. Blacha krzemowa izotropowa (nieorientowana) jest stosowana rzadziej, mimo jej istotnych zalet, takich jak niższa cena oraz dobra obrabialność. Blachy te są produkowane o typowych grubościach od 0,35 mm do 0,65 mm i zawartości krzemu od 0,2% do 3%. W niektórych przypadkach, np. przekładnikach napięciowych, wysoka stratność tej blachy (ok. 1 W/kg przy $B = 1T$) pozwala wyeliminować niebezpieczeństwo powstawania ferrozonansu. Przenikalność magnetyczna średnia, względna na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania wynosi ok. $(10 - 12) \cdot 10^3$.

Biorąc pod uwagę specjalne rozwiązania przekładników prądowych lub napięciowych oraz konstrukcje na podwyższone częstotliwości, należy obecnie liczyć się z koniecznością stosowania lepszych materiałów magnetycznych, tzn. o mniejszych stratnościach p_{Fe} i większych przenikalnościach. Poniżej scharakteryzowano podstawowy materiał magnetyczny tzn. blachy krzemowe anizotropowe oraz inne nowoczesne materiały magnetycznie miękkie tzn. taśmy amorficzne i nanokrystaliczne.

Jak wiadomo, w tych materiałach znaczenie praktyczne mają jedynie (ze względu na temperaturę Curie) trzy pierwiastki: żelazo, nikiel i kobalt oraz ich stopy. Procentowy udział tych pierwiastków w stopie decyduje o przenikalności magnetycznej i indukcji nasycenia. Im większa jest zawartość żelaza w stopie, tym większa jest indukcja nasycenia, natomiast obecność niklu działa obniżająco na indukcję nasycenia.