



W poprzednim odcinku zasygnalizowano w ogólnym zarysie problem szczeliny powietrznej w rdzeniu ferrytowym.

Przetwornice impulsowe Potworki i straszydła

Wpływ szczeliny

Sprawę szczeliny zasygnalizowałem ci na prostym przykładzie „sprężynek” powietrza. Naprawdę nie chciałem cię męczyć, ale niestety muszę ci podać kolejne ważne informacje. Musimy bardziej wnikliwie przeanalizować wpływ szczeliny na obwód magnetyczny.

Do tej pory analizowaliśmy toroidalny rdzeń ferrytowy o długości l z cewką o z zwojach.

Oto bardzo ważny wzór, który już dobrze znasz:

$$SMM = I \times z = H \times l$$

Wzór ten jak ulał pasował do rdzenia w kształcie toroidu (por. rysunek 12 w EdW 1/98).

Teraz dobrą piłką przecięliśmy ten rdzeń w pewnym miejscu i mamy rdzeń ze szczeliną.

Otrzymał się obwód magnetyczny zbudowany z dwóch odcinków o różnych właściwościach magnetycznych. Jak zapisać wzorem sytuację? Co z tego wynika w praktyce?

To proste: napięcie magnetyczne się nie zmieniło, nadal

$$SMM = I \times z$$

Ale co z $H \times l$? Całkowita długość nadal jest równa l przy czym $l = l_x + l_y$, gdzie l_x – długość rdzenia i l_y – długość szczeliny powietrznej.

Znów skorzystajmy z analogii. Niech teraz nasz obwód elektryczny z rysunku 11, który potem narysowaliśmy inaczej na rysunku 12a, zawiera dwa szeregowo połączone pręty z różnych metali – sytuację pokazuje rysunek 20a. Oczywiście napięcie U_A rozłoży się na tych dwóch opornościach.

$$U_A = U_x + U_y$$

Na rysunku 20b znajdziesz odpowiedni obwód magnetyczny: rdzeń ferrytowy ze szczeliną.

Odwołajmy się do obwodu elektrycznego z rysunku 20a. Gdybyśmy znali długość tych prętów oraz wartość G (napięcia przypadającego na jednostkę długości) dla każdego pręta, to możemy skorzystać z zależności

$$U = G \times l$$

i zapisać:

$$U_A = U_x + U_y = G_x \times l_x + G_y \times l_y$$

Analogicznie możemy zapisać:

$$SMM = I \times z = SMM_x + SMM_y = H_x \times l_x + H_y \times l_y$$

Do tej pory wszystko jest jasne – napięcie w obu przypadkach rozłoży się na dwie części.

Co możesz powiedzieć o wartości G_x i G_y oraz H_x i H_y ?

Pomyśl sam.

Szczerze mówiąc, z ostatniego wzoru rzeczywiście niewiele wynika... Ponieważ $l_x + l_y = l$ możesz przypuszczać, że natężenie pola H_x albo jest równe natężeniu H w rdzeniu bez szczeliny, albo jest mniejsze. Zapewne nie jest większe, bo nie ma powodu, by było większe.

Żeby to wyjaśnić, spróbuj odpowiedzieć na pytanie, czy w obwodzie elektrycznym $G_x = G_y$? Na pierwszy rzut oka może ci się wydawać, że tak – przecież to jest ten sam obwód. Jeśli jednak trochę wyteżysz szare komórki, dojdiesz do wniosku, że G_x nie musi i zazwyczaj wcale nie jest równe G_y . Jednakowoż jest tylko prąd elektryczny I płynący przez oba pręty.

Jeśli chcesz się bawić we wzory, dla obu fragmentów obwodu możemy zapisać na podstawie prawa Ohma ($I = U/R$):

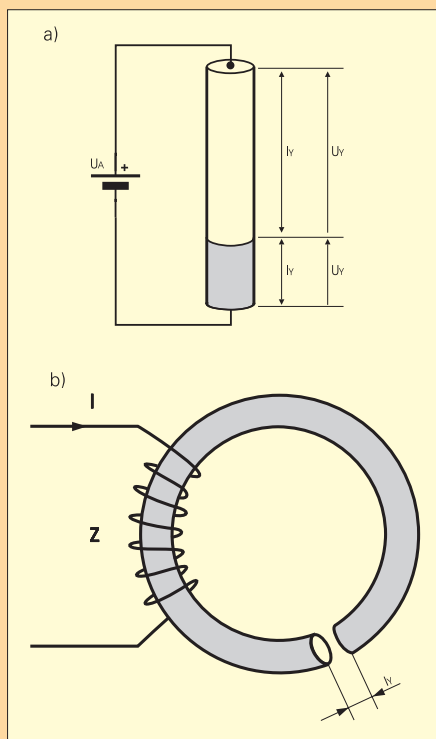
$$I = \frac{U_x}{R_x} = \frac{U_y}{R_y}$$

W obwodzie magnetycznym jednakoowy jest też prąd (czyli strumień) magnetyczny Φ oraz indukcja B (bez większego błędu przyjmujemy, iż pole przekroju S rdzenia i szczeliny jest takie same). Możemy więc zapisać:

$$\Phi = \frac{SMM_x}{Rm_x} = \frac{SMM_y}{Rm_y}$$

Wiesz, że

$$R = \frac{l}{\gamma \times S}$$



Rys. 20a. Obwód elektryczny złożony z dwóch materiałów

Rys. 20b. Obwód magnetyczny ze szczeliną

Listy od Piotra

$$R_m = \frac{l}{\mu \times S}$$

podstawiamy do poprzednich wzorów:

$$I = \frac{U_x \times \gamma_x \times S}{l_x} = \frac{U_Y \times \gamma_Y \times S}{l_Y}$$

przekształcamy i porządkujemy:

$$I = S \left(\frac{U_x}{l_x} \times \gamma_x = \frac{U_Y}{l_Y} \times \gamma_Y \right)$$

$$\Phi = S \left(\frac{SSM_x}{l_x} \times \mu_x = \frac{SSM_Y}{l_Y} \times \mu_Y \right)$$

otrzymujemy:

$$\text{gęstość prądu} = \frac{I}{S} = \gamma_x \times G_x = \gamma_Y \times G_Y$$

$$\frac{\Phi}{S} = B = \mu_x \times H_x = \mu_Y \times H_Y$$

Inaczej mówiąc, w obwodzie magnetycznym z rysunku 20b $\mu_x \times H_x$ musi być równe $\mu_Y \times H_Y$

Jeśli μ_x (ferrytu) jest dużo większe, niż μ_Y (powietrza), to dla zachowania podanej równości H_Y musi być tyleż razy większe niż H_x .

Wychodzi na to, że istotnie H_x i H_Y wcale nie muszą być i zazwyczaj wcale nie są równe. Chyba, że przez czysty przypadek, gdy μ_x i μ_Y są równe, co na pewno nie ma miejsca w przypadku ferrytu i powietrza.

Cóż, ostatni wniosek jest jasny, ale może te wzory i przekształcenia były dla Ciebie za trudne. Spróbuj poczuć to intuicyjnie. Jeszcze raz wróć do obwodu elektrycznego:

Na pewno obwodzie z rysunku 20a przez oba połączone szeregowo pręty MUSI płynąć ten sam prąd I.

Wiesz, że przy dwóch szeregowo połączonych opornościach, napięcia na nich będą proporcjonalne do tych oporności – to zasada znana wszystkim uczniom. Jeśli przykładowo jedna z oporności jest czterokrotnie większa od drugiej, to napięcie U_A rozłoży się w stosunku 4:1. Na większej rezystancji R_X napięcie wyniesie $0,8 U_A$, na mniejszej rezystancji R_Y napięcie wyniesie $0,2 U_A$. To potrafi policzyć każdy, nawet początkujący elektronik, korzystając z prawa Ohma. Rozpatrywana sprawa jest trochę trudniejsza, bo trzeba uwzględnić zarówno długość l obu części obwodu, jak i przewodność obu materiałów (nie trzeba natomiast zastanawiać się nad przekrojem S, bo jest jednakowy dla obu prętów). Wiele elektroników tłumaczy sobie po cichu, że napięcie „samo z siebie” dzieli się, czy raczej dopasowuje do oporności rezystorów by zachować jednakową wartość prądu w obu elementach. Rzeczywiście,

można uważać, że napięcie „nie ma innego wyjścia”, tylko tak się podzielić na oba opory, żeby przez te opory popłynął jednakowy (ten sam) prąd. Musi się tak podzielić, bo w innym wypadku prąd płynący przez oba opory ($I = U/R$) nie byłby jednakowy, co przy połączeniu szeregowym jest niemożliwe – prąd płynący przez oba opory musi być ten sam. Analogicznie można powiedzieć, że **wartości G w obu prętach też się „same” dopasują w ten sposób, by zapewnić przepływ tego samego prądu przez oba pręty**. Potoczne stwierdzenie głosi, że w obwodzie szeregowym napięcie dopasowuje się do oporów, teraz możemy powiedzieć, że G dopasowuje się do... przewodności materiału. Jeśli przewodność materiału jest większa, to do uzyskania danej wartości prądu wystarczy mniejsza wartość G. Jeśli z kolei materiał ma mniejszą przewodność (słabiej przewodzi prąd), to dla uzyskania tej samej wartości prądu, G musi mieć większą wartość. To chyba trafia ci do przekonania?

W obwodzie magnetycznym jest tak samo. Prąd, a właściwie strumień magnetyczny wyobraziliśmy sobie jako pewną liczbę „linii pola” zamkniętych w rdzeniu. Linie te muszą być ciągłe. Nie mogą się nagle urywać. Uważaj, to istotne – **w ferrycie rdzenia musi być praktycznie tyle samo „linii pola” co w szczelinie**. Praktycznie **taka sama** powinna też być w całym obwodzie **gęstość tych „linii” czyli indukcja magnetyczna B**.

Czyli $\Phi_X = \Phi_Y$ oraz $B_X = B_Y$

Wcześniej poznałeś charakterystykę magnesowania materiału magnetycznego. Ze względów praktycznych wykres przedstawia zależność indukcji B od natężenia pola H, które jest napięciem magnetycznym przypadającym na jednostkę długości.

Na **rysunku 21** na jednym wykresie zaznaczyłem ci dwie charakterystyki: zależność indukcji od natężenia pola dla jakiegoś ferrytu i dla powietrza. Nachylenie jest miarą μ . Czym bardziej stromy przebieg charakterystyki, tym większa

wartość μ . Powietrze i próżnia mają beznadziejnie małą wartość μ , zwykle kilka do kilkunastu tysięcy razy mniejszą niż ferryt – na rysunku 21 dla celów poglądowych narysowałem trochę zbyt optymistycznie wykres zależności B od H ($B = \mu_0 \times H$ gdzie μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni) – zasadniczo prosta reprezentująca powietrze powinna przebiegać jeszcze bardziej płasko.

W ferrycie i w szczelinie musi być zachowana taka sama wartość strumienia ($\Phi_X = \Phi_Y$) oraz indukcji ($B_X = B_Y$), więc natężenie pola H musi się odpowiednio rozłożyć (dopasować). Tak, by w obu materiałach uzyskać taką samą wartość indukcji. Na rysunku 21 pokazują to zielone linie. Sam widzisz, że dla uzyskania w sumie niewielkiej indukcji B_1 , w szczelinie musi wystąpić natężenie H_1 o bardzo dużej wartości.

Oczywiście zgadza się to z wcześniej wyprowadzonym wzorem:

$$\mu_x \times H_x = \mu_Y \times H_Y$$

Przemyśl to dokładnie – powinieneś to dobrze zrozumieć. Co z tego wynika w praktyce?

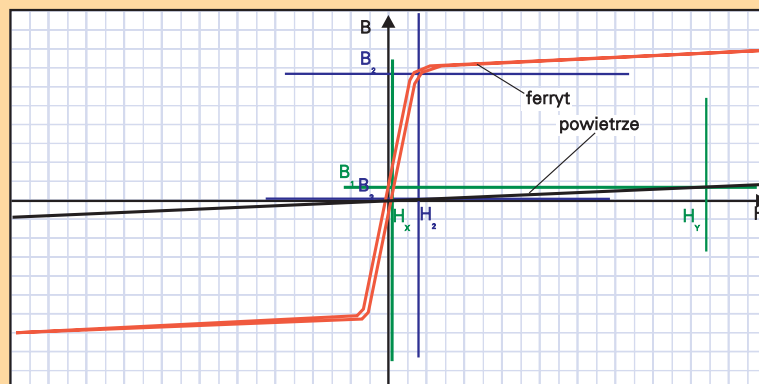
Jeśli przenikalność ferrytu jest, powiedzmy, 5000 razy większa od przenikalności powietrza, to (uważaj teraz!) natężenie pola w szczelinie musi być 5000 razy większe niż w ferrycie! Tak wychodzi ze wzoru i potwierdza to rysunek 21. To jest bardzo ważny wniosek, ale na tym nie koniec.

Zauważ, że nigdzie tu nie występuje długość l. Istotnie na razie wiemy tylko, że natężenie pola jest odwrotnie proporcjonalne do przenikalności μ obu ośrodków. Teraz zbadajmy wpływ długości l.

A skąd bierze się natężenie pola? Oczywiście w gruncie rzeczy wytworzone jest przez prąd płynący w cewce.

$$SMM = I \times z$$

Mamy więc stałą wartość $I \times z$, zupełnie niezależną od tego, czy cewka ma rdzeń pełny, czy rdzeń ze szczeliną, czy jest cewką powietrzną. Inaczej mówiąc, „zasilające” napięcie magnetyczne (SMM) jest stałe. To napięcie rozdzieli się



Rys. 21. Magnesowanie ferrytu i powietrza

na dwie części. Zgodnie z rysunkiem 20 możemy zapisać:

$$SMM = I \times z = SMM_X + SMM_Y = H_X \times l_X + H_Y \times l_Y$$

I wreszcie dotarliśmy do sedna sprawy.

Jeśli ferrytowy rdzeń nie ma szczeliny ($l_Y = 0$), całe to napięcie magnetyczne przypadnie na rdzeń i w rdzeniu tym wystąpi pole o natężeniu $H = \frac{I \times z}{l}$

Zgodnie z rysunkiem 21 wywoła to w rdzeniu znaczną indukcję B_2 .

Gdy usuniemy rdzeń ferrytowy, to samo natężenie H wywoła w „powietrznym rdzeniu” bardzo małą indukcję B_3 . Zaznaczyłem ci to kolorem niebieskim.

A w obecności szczeliny?

Rozważmy dwa przykłady. Niech nadal przenikalność ferrytu μ_X jest 5000 razy większa od przenikalności powietrza μ_Y ($\mu_X = 5000 \mu_Y$).

Zgodnie z wcześniejszą zależnością

$$\begin{aligned} \mu_X \times H_X &= \mu_Y \times H_Y \\ 5000 \mu_Y \times H_X &= \mu_Y \times H_Y \\ \text{czyli } H_Y &= 5000 \times H_X \end{aligned}$$

Załóżmy teraz, że szczelina ma długość 100 razy mniejszą od długości ferrytu, czyli $l_Y = l_X / 100$

podstawiamy powyższe do wzoru:

$$SMM = I \times z = SMM_X + SMM_Y = H_X \times l_X + H_Y \times l_Y$$

Otrzymujemy:

$$\begin{aligned} SMM &= I \times z = SMM_X + SMM_Y = \\ H_X \times l_X + 5000 H_X \times l_X / 100 &= \\ H_X \times l_X + 50 \times (H_X \times l_X) \end{aligned}$$

czyli napięcie magnetyczne na szczelinie ($SMM_Y = 100 H_Y \times l_Y$) jest pięćdziesiąt razy większe (!) niż napięcie magnetyczne na ferrycie. A przecież szczelina jest stosunkowo niewielka.

Zmniejszmy więc szczelinę jeszcze bardziej. Niech nasz rdzeń ma „pomijalnie wąską” szczelinę o długości 5000 razy mniejszej od drogi magnetycznej w ferrycie. Przykładowo będzie to szczelina o długości 0,01mm dla rdzenia o długości drogi magnetycznej 5cm. Jedna setna milimetra to mniej niż grubość włosa. I co nam taka mikroskopijna szczelina zmieni w sporym rdzeniu?

Liczmy:

$$l_Y = \frac{l_X}{5000}$$

podstawiamy (pamiętając, że $H_Y = 5000 \times H_X$)

$$SMM = I \times z = SMM_X + SMM_Y =$$

$$H_X \times l_X + 5000 H_X \times \frac{l_X}{5000} = H_X \times l_X + H_X \times l_X$$

Jesteś zaskoczony? Na „pomijalnie wąskiej” szczelinie napięcie magnetyczne jest takie same, jak na nieporównanie dłuższym odcinku ferrytu!

Zapamiętaj więc ważny wniosek: nawet szczelina o bardzo małych wymiarach znacznie wpływa na właściwości obwodu magnetycznego.

W praktyce szczelina ma szerokość setnych części milimetra, tylko wyjątkowo sięga 0,5...1mm.

Chcesz wiedzieć coś więcej? Bez szczeliny natężenie pola w rdzeniu wynosiło

$$H = \frac{I \times z}{l}$$

Z „pomijalnie wąską” szczeliną

$$I \times z = H_X \times l_X + H_Y \times l_Y = 2 (H_X \times l_X)$$

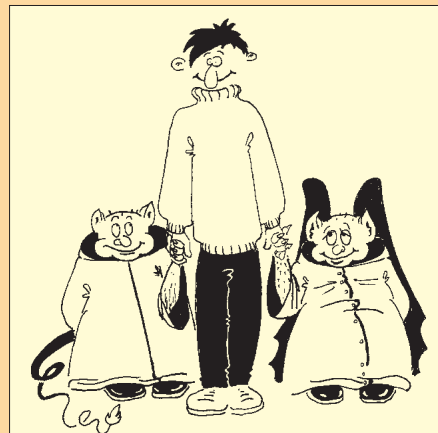
Czyli natężenie pola w rdzeniu

$$H_X = \frac{I \times z}{2 \times l}$$

jest przy tym samym prądzie I , dwukrotnie mniejsze, niż w rdzeniu bez takiej szczeliny. A jeśli natężenie pola jest dwukrotnie mniejsze, wtedy oczywiście odpowiednio mniejsza jest indukcja B .

Czy to dobrze, czy źle? Ty przecież chcesz zmagazynować w cewce możliwie dużą ilość energii. Żeby tak było, nie powinniśmy zmniejszać indukcji w ferrycie, tylko pracować przy wartościach indukcji niewiele mniejszych od indukcji nasycenia. Jeśli wprowadzenie szczeliny zmniejszyło indukcję, powinniśmy tę indukcję zwiększyć do poprzedniej wartości. Jak? Oczywiście zwiększając natężenie pola, a to przez zwiększenie napięcia magnetycznego $I \times z$. Nie będę ci tego wykazywał wzorem, ale chyba czujesz, że dzięki wprowadzeniu szczeliny i zwiększeniu wartości $I \times z$ zmagazynujesz teraz więcej energii, niż w cewce z rdzeniem bez szczeliny.

Zrozumiałeś? Wprowadzenie szczeliny zmniejszyło indukcję, a my chcemy pracować przy możliwie dużej indukcji. Po wprowadzeniu szczeliny, aby utrzymać tę dużą indukcję można i trzeba zwiększyć prąd I lub liczbę zwojów z .



Nie do końca jasne? To spróbujemy trochę prościej jeszcze raz:

Zwiększając szczelinę wtrącasz do obwodu magnetycznego dużą rezystancję

(magnetyczną). Całkowita rezystancja magnetyczna rdzenia (ze szczeliną) wzrasta. Jeśli napięcie magnetyczne jest takie same, a rezystancja magnetyczna wzrosła, to prąd (strumień) magnetyczny na pewno się zmniejszy. A zmniejszenie się strumienia oznacza zmniejszenie indukcji B w rdzeniu.

Jeśli chcesz utrzymać dopuszczalną dla danego rdzenia indukcję (przy okazji zwiększając ilość magazynowanej energii), możesz i powinieneś śmiało zwiększać napięcie magnetyczne. A napięcie magnetyczne to

$$SMM = I \times z$$

Czyli możesz zwiększać prąd elektryczny płynący przez cewkę, bądź liczbę jej zwojów, nie powodując nasycenia materiału magnetycznego rdzenia.

Jeśli to rozumiesz, to bardzo dobrze, ale nie ciesz się zanadto, bo w praktyce sprawa nie wygląda wcale słodko. Żeby przeprowadzić ściśle obliczenia musiałbyś się sporo natrudzić. W grę wchodzi tu bowiem kilka związanych ze sobą czynników. Nie będziemy się w to wglębiać – chcę ci tylko pokazać, że wprawdzie szczelina pozwala zgromadzić więcej energii, ale bardzo komplikuje obliczenia.

Sam rozumiesz, że nie sztuka ot po prostu zwiększyć szczelinę. Taka operacja zmniejsza bowiem wypadkową przenikalność rdzenia i tym samym indukcyjność. Zmienia też indukcję w rdzeniu, a my chcemy pracować przy możliwie dużej indukcji, bliskiej indukcji nasycenia. Trzeba zwiększać liczbę zwojów lub prąd.

Już rzut oka na wzór na energię

$$E = \frac{z^2 \times I^2 \times \mu \times S}{2l}$$

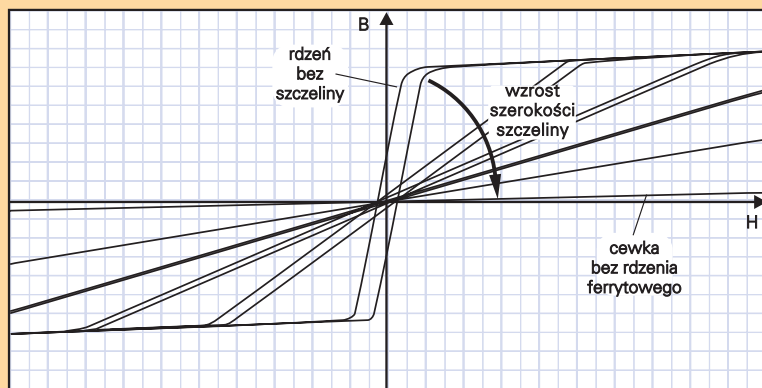
pokazuje, że sprawa jest skomplikowana. Ze wzorami może byśmy sobie zresztą poradzi, ale jest gorszy problem: jak w praktyce ustalać, czy mierzyć szerokość szczeliny, rzędu ułamka milimetra?

Choć nie będę ci podawał dalszych wzorów do analizy obwodu ze szczeliną (to zresztą jest ślepa uliczka), jesteś już o krok od pełnego zrozumienia wpływu szczeliny na obwód. Ale to jeszcze nie wszystko, co musisz wiedzieć o szczelinie.

Nie masz chyba wątpliwości, że wprowadzenie szczeliny zmniejsza wypadkową przenikalność μ . Dla rdzeni często podaje się wypadkową (efektywną) wartość przenikalności, oznaczoną w katalogach μ_e lub μ_{eff} .

(Ale to wcale nie znaczy, że owo μ_e jest równe używanej przez praktyków wartości A_L . Wartość A_L zależna jest nie tylko od przenikalności, ale i od wymiarów geometrycznych rdzenia.)

Oczywiście różne wartości μ_e i odpowiadające im wartości A_L uzyskuje się w prosty sposób, zmieniając wymiar



Rys. 22. Wpływ szczeliny na wypadkową charakterystykę rdzenia

szczeliny. **Rysunek 22** pokazuje, jak zmienia się wypadkowa przenikalność rdzenia przy różnych szerokościach szczeliny.

Co jeszcze wynika z tego rysunku?

Między innymi to, że po wprowadzeniu szczeliny radykalnie zwiększa się wypadkowa liniowość – pętla histerezy nie daje już tak o sobie znać. Wcześniej mówiłem ci, że przy cewkach przeznaczonych np. do filtrów czy innych precyzyjnych zastosowań, trzeba się liczyć z występowaniem zniekształceń (harmonicznych), mających źródło w pętli histerezy. Chyba czując ten problem „przez skórę” zastanawiałeś się, dlaczego cewki pracujące choćby w obwodach rezonansowych nie wprowadzają ogromnych zniekształceń, czego należałoby się spodziewać po pokrzywionej pętli histerezy. Teraz masz odpowiedź: cewka z rdzeniem bez szczeliny rzeczywiście wprowadzałaby duże zniekształcenia. Tylko dzięki szczelinie uzyskuje się dobrą liniowość i małe zniekształcenia. Dlatego do precyzyjnych cewek nie używa się rdzeni toroidalnych, mających bardzo duże wartości μ i A_L (A_L rzędu kilku tysięcy). Używa się natomiast rdzeni kubkowych i typu RM lub X o stałej A_L rzędu kilkudziesięciu do kilkuset.

Wprowadzenie szczeliny zmniejsza przenikalność (oraz współczynnik A_L), co dla uzyskania danej indukcyjności wymaga stosowania większej ilości zwojów, ale jednocześnie radykalnie prostuje charakterystykę, i tym samym zmniejsza zawartość harmonicznych. Masz tu kolejny dowód, że projektowanie cewek do bardzo precyzyjnych zastosowań to coś więcej niż znalezienie liczby zwojów przy danym współczynniku A_L ! Może czasem się zastanawiałeś, dlaczego niektóre cewki muszą być takie duże? Teraz znalazłeś odpowiedź. Sam ferryt nie jest zbyt stabilny. Jego parametry (w tym przenikalność) w znacznym stopniu zmieniają się z temperaturą i z upływem czasu. Ponadto pokrzywiona pętla histerezy wprowadzałaby ogromne zniekształcenia nie-

liniowe. Aby uzyskać małe zniekształcenia oraz dużą stabilność cieplną i długoczasową, trzeba zastosować rdzeń ze stosunkowo szeroką szczeliną, czyli małą wartością A_L . Parametry powietrza są bowiem nieporównanie bardziej stabilne niż ferrytu.

Wprowadzenie szczeliny radykalnie zmniejsza przenikalność i stałą A_L (z kilku tysięcy do kilkudziesięciu lub kilkuset). To z kolei dla osiągnięcia danej indukcyjności wymaga dużej liczby zwojów. Żeby przy dużej liczbie zwojów uzyskać dużą dobroć Q , rezystancja cewki musi być mała, czyli uzwojenie ma być wykonane odpowiednio grubym drutem. Takie uzwojenie wymaga dużo miejsca, czyli zastosowania odpowiednio dużego rdzenia. Zauważ, że rdzeń o dużych wymiarach pojawił się tu nie ze względu na przenoszoną moc (która jest znikoma), ale ze względu na konieczność uzyskania stabilności cieplnej, małych zniekształceń nieliniowych i dużej dobroci Q . Teraz już widzisz, że zaprojektowanie cewki do jakiegoś precyzyjnego filtra nie jest wcale łatwą sprawą, bo trzeba jakoś obliczyć spodziewaną dobroć (i to nie dla prądu stałego, ale dla częstotliwości pracy) oraz oszacować stabilność cieplną i poziom wprowadzanych zniekształceń. Procedury takiego precyzyjnego projektowania cewek do filtrów znajdziesz w katalogach rdzeni ferrytowych. Tak to już jest z cewkami. Na twoje szczęście filtry LC odchodzą pomału do lamusa. Są wypierane przez filtry z tak zwanymi przełączalnymi pojemnościami (w postaci układów scalonych). Ale to już temat z zupełnie innej bajki.

Oczywiście omówiona właśnie kwestia dobroci i stabilności jest istotna w cewkach pracujących w precyzyjnych obwodach sygnałowych. Nie ma ona większego znaczenia w cewkach przeznaczonych do przetwornicy, gdzie nie zależy nam na stabilności parametrów i liniowości, a wymiary rdzenia wyznaczone są jedynie przez wymaganą moc przetwornicy i nieodłączne straty.

Teraz jeszcze raz wracamy do pytania: czy mając daną cewkę z rdzeniem, obliczoną do pracy w konkretnej przetwornicy, możesz polepszyć właściwości przetwornicy, wprowadzając, bądź zwiększając szczelinę? (nie jest to problemem – wystarczy rozłączyć połówki rdzenia i wsunąć między nie choćby kawałeczki grubszego papieru.)

Na pierwszy rzut oka, warto zwiększać szczelinę, bo zwiększa to ilość magazynowanej energii, ale właśnie tu tkwi **pułapka, o której musisz pamiętać!**

Przede wszystkim, tak po prostu zwiększając szczelinę, **znacznie zmniejszyłbyś indukcyjność**. A chyba nie o to ci chodzi? Aby utrzymać indukcyjność, musiałbyś (znacznie) zwiększyć liczbę zwojów. Dla danego rdzenia musiałoby to oznaczać konieczność użycia cieńszego drutu, co drastycznie zwiększyłoby rezystancję cewki. Zwiększyłoby tym samym straty w postaci ciepła wydzielającego się na tej rezystancji przy przepływie prądu. Jeśli przesadzisz z tą szczeliną, te dodatkowe straty w rezystancji uzwojenia całkowicie zniweczą wszelkie korzyści wynikające ze zwiększenia możliwości magazynowania energii w szczelinie.

Tak samo będzie, jeśli nie zwiększysz liczby zwojów, tylko będziesz pracował przy mniejszej indukcyjności i większych prądach.

W każdym razie dadzą o sobie znać straty na rezystancji uzwojenia

$$P = I^2 \times R$$

Jeśli w planowanej przetwornicy w celu zmniejszenia strat cieplnych w uzwojeniu, próbowałbyś zastosować małą indukcyjność (małą liczbę zwojów grubego drutu), to musiałbyś pracować przy dużych częstotliwościach. Ale już wcześniej tłumaczyłem ci, że nie możesz nadmiernie zwiększać częstotliwości, bo rosną wtedy straty w rdzeniu wynikające z histerezy. Nie zapominaj też o większych stratach w tranzystorach przełączających.

Już chyba czujesz, że nie istnieje tu jakaś ścisła granica. I wcale nie ma tu prostego wzoru, który precyzyjnie rozwiązałby problem.

Przykładowo w niektórych źródłach spotkasz zalecenie, by tak projektować przetwornice, aby moc strat w rezystancji uzwojenia była równa sumie strat w rdzeniu (z histerezy i prądów wirowych). Fajne zalecenie, ale jak się słusznie domyślasz, nie tak łatwo to obliczyć. Moc strat w rezystancji uzwojenia to pół biedy, ale do obliczenia strat w rdzeniu musisz mieć dodatkowe dane o zależności strat cieplnych od częstotliwości oraz maksymalnej indukcji.

Pomyśl o innych trudnościach

Wszystkie występujące straty spowodują grzanie i znaczny wzrost temperatu-

ry. W takim razie trzeba uwzględnić jeszcze inne czynniki, choćby zmiany parametrów rdzenia i uzwojenia pod jej wpływem, a także temperaturę Curie (w której rdzeń zupełnie straci właściwości magnetyczne).

Krótko mówiąc trzeba byłoby obliczyć, o ile wzrośnie temperatura rdzenia. Zwykle zakłada się, że temperatura wnętrza **rdzenia** nie może przekroczyć $+100^{\circ}\text{C}$. Związane jest to nie tylko z właściwościami magnetycznymi rdzenia, ale również z odpornością izolacji przewodu nawojowego cewki na wysokie temperatury. We wnętrzu uzwojenia temperatura będzie jeszcze wyższa niż temperatura rdzenia. Izolacja typowego drutu nawojowego wytrzymuje nie więcej niż $+130^{\circ}\text{C}$ (wzmocniona odmiana do $+150^{\circ}\text{C}$ i $+180^{\circ}\text{C}$).

Nie pomyślałeś o tym, prawda? A czy potrafisz obliczyć temperaturę we wnętrzu uzwojenia cewki? A temperaturę wnętrza rdzenia w najgorętszym punkcie (tzw. hot spot)?

Ponieważ w twojej cewce i elementach układu będą występować straty, powinieneś policzyć także ogólną sprawność, by się nie okazało, że sprawność przetwornicy jest kiepska i cała gra nie jest warta świeczki.

Zapewniam cię, że nie jest to wcale łatwe. A takie obliczenia powinieneś przeprowadzić, jeśli chcesz być rzetelnym konstruktorem.

A może powiesz, że ty będziesz stosował większe rdzenie, grubszy drut, wszystko z zapasem na wszelki wypadek. W porządku, jeśli chcesz do wożenia codziennych zakupów używać 20-tonowej ciężarówki, to twoja sprawa. Jeśli jednak zgodnie z obecnymi trendami chciałbyś zaprojektować możliwie małą przetwornicę, musiałbyś uwzględnić wszystkie wymienione czynniki.

To co, czyżby, krótko mówiąc – mogiła?

A przed miesiącem wydawało ci się, że po zrozumieniu tego nieszczęsnego B i H już wszystko wiesz o obwodach magnetycznych i świat (przetwornic impulsowych) leży u twych stóp. I teraz wszystko posypało się jak domek z kart! Nie wystarczy znać książkową teorię, należałoby bowiem uwzględnić nie tylko wpływ szczeliny, ale też umieć obliczać wszystkie straty cieplne (w uzwojeniu i rdzeniu), by nie przegrzać rdzenia i zachować wysoki współczynnik sprawności przetwornicy.

Potwierdziło się powszechne przekonanie, że precyzyjne obliczanie cewek czy transformatorów do przetwornic impulsowych naprawdę nie jest łatwym zadaniem. Z transformatorami do sieciowych zasilaczy impulsowych (współpracującymi z siecią 220V) sprawa jest jeszcze trudniejsza, bo trzeba dodatkowo

uwzględnić przepisy bezpieczeństwa wymagające określonych odstępów izolacyjnych.

Uważaj teraz! To bardzo ważne!

Niestety, nie ma jednego jedynie słusznego wzoru na obliczanie cewek do przetwornic większej mocy!

Ponieważ trzeba uwzględnić wiele czynników, różni autorzy proponują odmienne podejścia do zagadnienia i uzyskują nieco odmienne wyniki. Zwykle cała procedura zaczyna się od tablic lub wykresów, pokazujących jaką moc można uzyskać z różnymi rdzeniami przy różnych częstotliwościach (ewentualnie przy różnych szerokościach szczeliny). Po wstępnym wyborze rdzenia odpowiedniej wielkości, należy przeprowadzić szczegółowe obliczenia, które wykażą, czy rzeczywiście uda się uzyskać założone parametry, nie przekraczając dopuszczalnej indukcji, temperatury i mocy strat. Na pewno potrzebne są do tego katalogi rdzeni ferrytowych. I to nie jakiegokolwiek katalogi rdzeni. Informacje zawarte w katalogach typowych rdzeni do filtrów (kubkowe, RM) nie zawsze wystarczą do precyzyjnego zaprojektowania cewki przetwornicy, choć same rdzenie w zasadzie się do tego nadają. Najlepiej zdobyć specjalny katalog rdzeni do przetwornic (ETD, EE), zawierający opis procedury projektowej dla przetwornic mocy.

Niestety, w niektórych źródłach zawierających sposób obliczania cewek do przetwornic występują błędy (zwykle są to tzw. błędy drukarskie), które nie pozwalają uzyskać prawidłowych wyników.

Czy się aby nie załamałeś? To po co były te wszystkie analizy, bicie głową w mur, by zrozumieć podane zależności, jeśli teraz na koniec i tak okazało się, że postawione zadanie obliczenia cewki do przetwornicy przerasta siły większości Czytelników EdW?

Rzeczywiście, nasze omawianie teorii obwodów magnetycznych to pasmo wzlotów i upadków. Co jakiś czas wydaje się nam, że już wiemy niemal wszystko, że otworzy się nam w głowie jakaś klapka i cała sprawa okaże się beznadziejnie prosta. Za chwilę przypominamy sobie o dodatkowych czynnikach i całe dobre samopoczucie bierze w łeb.

Niestety tak to już jest z tymi obwodami magnetycznymi. To, co podaje się w podręcznikach dla szkół średnich jest tylko wierzchołkiem góry lodowej. Podręczniki zawierają zazwyczaj tylko elementarne podstawy, a podane w nich wzory okazują się zupełnie nieprzydatne w praktyce. Szczerze mówiąc bardziej wprowadzają w błąd niż czegoś uczą. Wzbudzają tylko apetyt i wyprowadzają w przysłowiowe maliny. Sam chyba widzisz na swoim przykładzie, że wiedza

którą wkuwałeś w szkole okazuje się być daleka od praktyki.

Z podstawowymi wiadomościami ze studiów jest niestety podobnie. Oczywiście informacje podawane w akademickich podręcznikach z teorii obwodów są jak najbardziej prawdziwe. Tylko od tej wiedzy do praktyki (czyli projektowania cewek do filtrów i przetwornic) jest jeszcze duży kawał drogi. Na domiar złego sposób wprowadzenia i zaprezentowania materiału z teorii obwodów wręcz mąci w głowie osobom, które zdążyły cośkolwiek „liznąć” praktyki. Takie jest moje zdanie w tej kwestii i myślę, że je podzielasz.

W każdym razie nie załamuj się! Nie zostawię cię z ręką w nocniku. Podejdziemy do sprawy z zupełnie innej strony – w słusznym czasie pokażę ci prosty i praktyczny sposób, by sprawdzić i zmierzyć kluczowe parametry każdej cewki, istotne dla jej pracy w układzie przetwornicy.

W najbliższym czasie przestanę cię wreszcie katować całą tą koszmarną teorią i zapoznam z jakże wdzięcznym i wcale nietrudnym tematem. Poznasz wreszcie trzy podstawowe układy pracy przetwornic. Choć na razie nie będziesz potrafił precyzyjnie zaprojektować cewki do przetwornicy, to jednak uzbrojony w zdobytą wiedzę, rozumiejąc ograniczenia, będziesz umiał wykonać praktyczny układ prostej przetwornicy i dobrać parametry zarówno cewki, jak i układu sterującego.

Jeśli natomiast chcesz zapoznać się bliżej z tematem projektowania cewek do przetwornic, zapoznaj się z pozycjami, wymienionymi na końcu artykułu.

Na razie spróbuj poukładać sobie w głowie wiadomości zdobyte w poprzednich miesiącach.

Zgodnie z zapowiedzią z poprzednich numerów musiałem przeprowadzić cię przez bagniste meandry teorii obwodów magnetycznych, byś miał obraz całości problemu i rozumiał występujące bariery.

Mam nadzieję, że ostatnie kilka moich listów pokazało ci ogólny obraz zagadnienia, a w szczególności pokazało ograniczenia, jakże ważne w praktyce, a pomijane w podręcznikach. Mam świadomość, że nie omówiliśmy wszystkiego do końca, ale jak cię znam, wszystko to, czego się dowiedziałeś o trudnościach i ograniczeniach, skutecznie odebrało ci chęć wgłębiania się w tajniki projektowania „na papierze” cewek do przetwornic. A może się mylę? W takim razie napisz do mnie.

Piotr Górecki

Bibliografia

- Ödön Ferenczi: *Zasilanie układów elektronicznych Przetwornice impulsowe*
 Ödön Ferenczi: *Zasilanie układów elektronicznych Zasilacze ze stabilizatorami do pracy ciągłej. Przetwornice DC - DC.*
 Katalog Philips: *Ferroxcube for power audio/video...*

Listy od Piotra

Ödön Ferenczi: Zasilanie układów elektronicznych Zasilacze ze stabilizatorami do pracy ciągłej Przetwornice DC-DC
Katalog Philips: Ferroxcube for power audio/video