

Stanisław PIRÓG¹

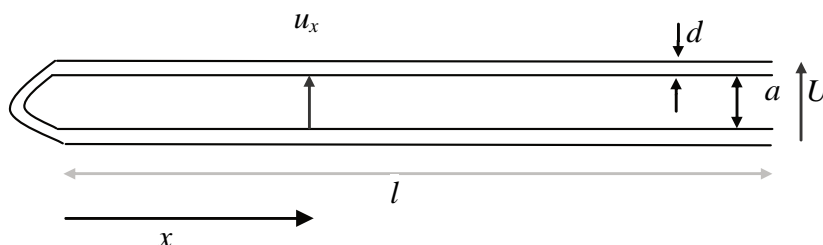
POJEMNOŚCI PASOŻYTNICZE UZWOJEŃ TRANSFORMATORÓW I DŁAWIKÓW

Pasożytnicze pojemności transformatorów i dławików stosowanych w impulsowych układach energoelektronicznych wpływają na kształt impulsu. Aby przewidzieć kształt impulsu, należy znać wartości pojemności pasożytniczych w zależności od geometrii transformatora impulsowego lub dławika. W artykule przedstawiono analityczne wyrażenia dla pojemności pasożytniczych uzwojeń wykonanych przewodem nawojowym oraz uzwojeń foliowych.

Słowa kluczowe: pojemność pasożytnicza transformatorów i dławików impulsowych, uzwojenie foliowe

1. Pojemności pasożytnicze uzwojeń wykonanych drutem nawojowym

1.1. Pojemność prostego przewodu o średnicy d zgiętego tak, by odległość była równa a .



Rys. 1. Wymiary zgiętego pręta

Fig. 1. Dimensions of the bent rod

¹ Stanisław Piróg, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1975, spirog@prz.edu.pl

Jeżeli pojemność elektryczna dwóch równoległych przewodów (niepołączonych) o długości l , średnicy d , ułożonych w odległości a (rys. 1), jest równa C_0 [6],

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon l}{\ln \left(\frac{a}{d} + 1 + \sqrt{\frac{a}{d} \left(\frac{a}{d} + 2 \right)} \right)} \quad (1)$$

to pojemność elementu o długości dx ma wartość:

$$dC_x = \frac{C_0}{l} dx \quad (2)$$

Pomiędzy oboma połączonymi odcinkami przewodu, w odległości x od punktu połączenia, występuje napięcie:

$$u_x = \frac{U}{l} x \quad (3)$$

Na odcinku o długości dx jest gromadzona energia o wartości:

$$dW = \frac{C_0 dx}{2l} u_x^2 = \frac{C_0}{2} \frac{U^2}{l^3} x^2 dx \quad (4)$$

W całej przestrzeni pomiędzy przewodnikami gromadzona jest energia pola elektrycznego o wartości:

$$W = \int_0^l \frac{C_0}{2} \frac{U^2}{l^3} x^2 dx = \frac{C_0}{6} U^2 \quad (5)$$

Energia o takiej wartości jest gromadzona w kondensatorze o pojemności C , przy napięciu U .

$$W = \frac{C}{2} U^2 = \frac{C_0}{6} U^2 \quad (6)$$

Stąd pojemność przewodu z rys. 1 ma wartość:

$$C = \frac{C_0}{3} \quad (7)$$

1.2. Pojemność międzyzwojowa jednej warstwy cewki

Pomiędzy przylegającymi do siebie punktami kolejnych zwojów cewki o w zwojach, zasilanej napięciem o wartości U , występuje napięcie o takiej samej wartości, równej:

$$U_w = \frac{U}{w} \quad (8)$$

Skoro różnica napięć ma wartość stałą, to energia pola elektrycznego gromadzona pomiędzy kolejnymi zwojami o pojemności C_w ma wartość:

$$W_w = \frac{C_w U^2}{2 w^2} \quad (9)$$

W całej cewce jest $w-1$ przestrzeni, w których gromadzona jest energia. Całkowita wartość energii gromadzonej w jednej warstwie uzwojenia cewki o w - zwojach, zasilanej napięciem U :

$$W = \frac{C_w U^2}{2} \frac{w-1}{w^2} \quad (10)$$

Energia o takiej wartości jest gromadzona w kondensatorze o pojemności C , przy napięciu U .

$$W = \frac{C}{2} U^2 = \frac{C_w U^2}{2} \frac{w-1}{w^2} \quad (11)$$

Stąd pojemność pasożytnicza jednowarstwowej cewki ma wartość:

$$C = C_w \frac{w-1}{w^2} \quad (12)$$

Pojemność ta ma niewielką wartość, szczególnie w przypadku dużej liczby zwojów. Wynika to z tego, że pojemność wypadkowa jest wynikiem szeregowego połączenia kolejnych cząstkowych pojemności poszczególnych

zwojów. Wartość pojemności między dwoma kolejnymi zwojami jest zależna od ich wymiarów geometrycznych, a w szczególności od długości zwoju l_w .

1.3. Pojemność pomiędzy kolejnymi warstwami uzwojenia

Na rys. 2 przedstawiono dwa możliwe sposoby realizacji uzwojenia N warstwowego (na przykładzie uzwojenia 3-warstwowego) zasilanego napięciem U .



Rys.2. Uzwojenie trójwarstwowe jednorodne (a) i uzwojenie uzyskane w wyniku szeregowego połączenia trzech identycznych cewek (b)

Fig. 2. Homogeneous three-layer winding (s) and the winding obtained from the series connection of three identical coils (b)

Na każdej pełnej warstwie uzwojenia N warstwowego występuje napięcie:

$$U_n = \frac{U}{N} \quad (13)$$

Pomiędzy punktami (zwojami) jednakowo oddalonymi od końca dwu cewek występuje napięcie:

Dla uzwojenia z rys. 2a:

$$U_x = \frac{2U}{Nl} x \quad (14)$$

Dla uzwojenia z rys. 2b:

$$U_x = \frac{U}{N} \quad (15)$$

Pojemność pomiędzy dwoma niepołączonymi wzajemnie uzwojeniami cylindrycznymi o długości l oraz o promieniu zewnętrznym cylindra wewnętrznego r_n , promieniu wewnętrznym cylindra zewnętrznego r_{n+} , rozdzielonymi izolacją o przenikalności ϵ i grubości d , może być w przybliżeniu

wyznaczona tak jak pojemność pomiędzy okładkami kondensatora płaskiego o powierzchni okładek równej średniej wartości powierzchni bocznej obu walców. Pojemność ta jest w przybliżeniu równa:

$$C_{0w} = k \frac{\varepsilon 2\pi \left(\frac{r_n + r_{n+1}}{2} \right) l}{d} \quad (16)$$

Dla uzwojenia transformatora o kwadratowym przekroju kolumny pojemność pomiędzy dwoma warstwami uzwojenia ma wartość:

$$C_{0w} = k \frac{\varepsilon 4 \left(\frac{a_n + a_{n+1}}{2} \right) l}{d} \quad (17)$$

przy czym: a – długość boku kwadratu.

Pojemność pomiędzy kolejnymi warstwami uzwojenia nie jest jednakowa, gdyż kolejne warstwy mają większą powierzchnię wynikającą z większej wartości rozmiaru promienia lub boku kwadratu zwoju, a tym samym większą powierzchnię okładek ekwiwalentnego kondensatora płaskiego. Jeżeli przenikalność elektryczna izolacji, sposób ułożenia uzwojenia i liczba zwojów (długość warstwy cewki są w każdej warstwie jednakowe, to przyrost wartości pojemności ΔC_w pomiędzy kolejnymi warstwami jest stały i wynika tylko ze zmiany powierzchni, a ta jest wprost proporcjonalna do liniowego wymiaru cewki (16) lub (17). Pojemność pomiędzy kolejnymi warstwami ma wartość:

$$C_{0wn} = C_{0w1} + (n-1)\Delta C_w \quad (18)$$

gdzie: C_{0w1} – pojemność pomiędzy pierwszą i drugą warstwą uzwojenia,
 n – numer kolejnej warstwy izolacyjnej pomiędzy uzwojeniami,
 ΔC_w – przyrost pojemności pomiędzy kolejnymi warstwami uzwojenia.

Dla elementarnej jednostki długości cewki dx pojemność ta ma wartość:

$$dC = \frac{C_{0wn}}{l} dx \quad (19)$$

Energia pola elektrycznego gromadzona w polu elektrycznym w pojemności dC pomiędzy sąsiednimi cewkami ma wartość:

Dla uzwojenia z rys. 2a:

$$dW_n = \frac{1}{2} dC \cdot U_x^2 = \frac{C_{0wn}}{2l} dx \cdot \left(\frac{2U}{Nl} \right)^2 x^2 \quad (20)$$

Energia gromadzona pomiędzy dwoma warstwami takiego uzwojenia ma wartość:

$$W_n = \frac{C_{0wn}}{2l} \left(\frac{2U}{Nl} \right)^2 \int_0^l x^2 dx = \frac{2}{3} C_{0wn} \frac{U^2}{N^2} \quad (21)$$

W N -warstwowym uzwojeniu jest $N-1$ obszarów, w których następuje magazynowanie energii pola elektrycznego (warstw izolacji między zwojowej). Całkowita energia pola elektrycznego takiego uzwojenia ma wartość:

$$W = \frac{2}{3} \frac{U^2}{N^2} \sum_1^{N-1} C_{0wn} \quad (22)$$

Energię o takiej samej wartości gromadzi, przy napięciu U , kondensator o pojemności C_N .

$$W = \frac{U^2 C_N}{2} = \frac{2}{3} \frac{U^2}{N^2} \sum_1^{N-1} C_{0wn} \quad (23)$$

Stąd wartość pojemności pasożytniczej całego uzwojenia:

$$C_N = \frac{4}{3N^2} \sum_1^{N-1} C_{0wn} \quad (24)$$

Po uwzględnieniu zależności (18) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} C_N &= \frac{4}{3N^2} \sum_{n=1}^{N-1} C_{0wn} = \frac{4}{3N^2} \sum_{n=1}^{N-1} [C_{0w1} + (n-1)\Delta C_w] = \\ &= \frac{4}{3N^2} \left[C_{0w1} (N-1) + \Delta C_w \frac{N-2}{2} (N-1) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

Stąd:

$$C_N = \frac{4(N-1)}{3N^2} [C_{0w1} + (N-2)\Delta C_w] \quad (26)$$

Przy założeniu, że wartości pojemności C_{own} pomiędzy kolejnymi warstwami niewiele się różnią ($\Delta C_w \approx 0$), pojemność pasożytnicza całego uzwojenia ma wartość:

$$C_N \approx \frac{4(N-1)}{3N^2} C_{0w1} \quad (27)$$

Dla sposobu uzwojania przedstawionego na rys. 2b w wyniku analogicznego rozumowania otrzymuje się wypadkową wartość pojemności pasożytniczej uzwojenia:

$$dW_n = \frac{1}{2} \frac{C_{0wn}}{l} dx U_x^2 = \frac{1}{2} \frac{C_{0wn}}{l} dx \left(\frac{U}{N} \right)^2 \quad (28)$$

$$W_n = \frac{1}{2} C_{0wn} \frac{U^2}{N^2} \quad (29)$$

$$W = \frac{U^2}{2N^2} \sum_1^{N-1} C_{0wn} \quad (30)$$

Energię o takiej samej wartości gromadzi, przy napięciu U , kondensator o pojemności C_N .

$$W = \frac{U^2 C_N}{2} = \frac{U^2}{2N^2} \sum_1^{N-1} C_{0wn} \quad (31)$$

Stąd, z uwzględnieniem (18) wartość pojemności pasożytniczej całego uzwojenia:

$$\begin{aligned} C_N &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-1} C_{0wn} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N-1} [C_{0w1} + (n-1)\Delta C_w] = \\ &= \frac{1}{N^2} \left[C_{0w1}(N-1) + \Delta C_w \frac{N-2}{2}(N-1) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Stąd:

$$C_N = \frac{(N-1)}{N^2} [C_{0w1} + (N-2)\Delta C_w] \quad (33)$$

Przy założeniu, że wartości pojemności C_{own} pomiędzy kolejnymi warstwami niewiele się różnią ($\Delta C_w \approx 0$), pojemność pasożytnicza całego uzwojenia ma wartość:

$$C_N = C_{0w1} \frac{(N-1)}{N^2} \quad (34)$$

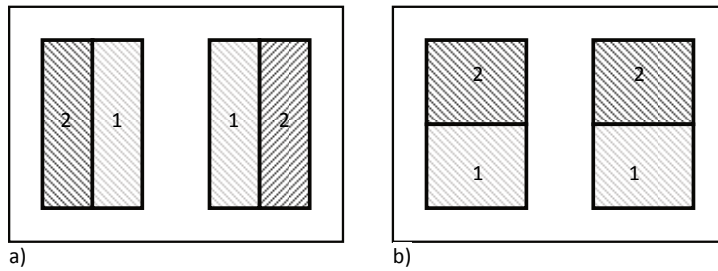
Pojemność wielowarstwowego uzwojenia połączonego jak na rys. 2b i wykonanego identycznie jak uzwojenie z rys. 2a jest mniejsza. Jest to jedna z możliwości zmniejszenia wartości pojemności pasożytniczej uzwojenia.

Z zależności (27) i (34) wynika, że w celu zmniejszenia wartości pasożytniczej pojemności korzystniej jest wykonać uzwojenia umieszczone na jednej kolumnie rdzenia i zajmujące po połowie wysokości kolumny, rozłożone w podwójnej liczbie warstw. Uzwojenie takie ma mniejszą pojemność własną międzywarstwową (mniejsza powierzchnia warstwy) i większą liczbę warstw (pojemności połączone szeregowo). Pojemność pasożytnicza uzwojenia wykonanego w postaci jednakowych cewek jednowarstwowych połączonych szeregowo ma wartość równą $\frac{3}{4}$ wartości pojemności pasożytniczej typowego uzwojenia (patrz (26) i (33)). Uzwojenie takie jest trudniejsze do wykonania ze względu na konieczność zewnętrznego łączenia początków i końców cewek poszczególnych warstw.

Ponadto można zmniejszyć pojemność pomiędzy warstwami uzwojenia stosując dodatkową warstwę izolacji wykonanej z materiału o możliwie małej przenikalności dielektrycznej i odpowiednio dobranej grubości.

W celu zmniejszenia tej pojemności należy tak projektować transformator, aby powierzchnia warstwy uzwojenia była możliwie mała. Wykonanie uzwojenia jako wielowarstwowego (krótka cewka) zmniejsza wypadkową pojemność, gdyż mniejsze pojemności większej liczby warstw połączone są szeregowo.

Na rys. 3 przedstawiono dwa sposoby rozmieszczenia uzwojeń transformatora. W obu przypadkach liczba zwojów jest taka sama. W transformatorze z rys. 3b cewki mają dwukrotnie więcej warstw. Pojemność pomiędzy warstwami jest prawie o połowę mniejsza ze względu na mniejszą powierzchnię warstwy wynikającą z mniejszej jej długości. Przykładowo dla uzwojenia rozmieszczonego na rys. 3a bliżej kolumny rdzenia pojemność pasożytnicza ma wartość wynikającą z zależności (26) lub (33).



Rys.3. Sposoby rozmieszczenia uzwojeń transformatora

Fig. 3. Methods of arrangement transformer windings

Pomiędzy liczbą warstw, pojemnością międzywarstwową i przyrostem pojemności pomiędzy kolejnymi warstwami uzwojenia z rys. 3a (1) i 3b (2) zachodzi związek: $N_2 = 2N_1$, $C_{0w12} = C_{0w11}/2$, $\Delta C_{0w2} = \Delta C_{0w1}/2$.

Pojemność pasożytnicza tego uzwojenia 2 (rys. 3) ma wartość:

$$\begin{aligned}
 C_{N2} &= \frac{4(N_2-1)}{3N_2^2} [C_{0w2} + (N_2-2)\Delta C_{w2}] = \\
 &= \frac{4(2N_1-1)}{3 \cdot 4N_1^2} \left[\frac{C_{0w1}}{2} + (2N_1-2) \frac{\Delta C_{w1}}{2} \right] = \\
 &= \frac{4(2N_1-1)}{3 \cdot 8N_1^2} [C_{0w1} + (2N_1-2)\Delta C_{w1}]
 \end{aligned} \tag{35}$$

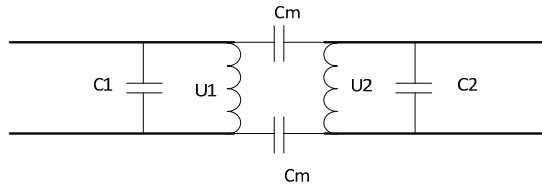
Pomiędzy wartościami pojemności pasożytniczych obu tych uzwojeń zachodzi relacja:

$$\frac{C_{N2}}{C_{N1}} = \frac{\frac{(2N_1-1)}{8N_1^2} [C_{0w1} + (2N_1-2)\Delta C_{w1}]}{\frac{(N_1-1)}{N_1^2} [C_{0w1} + (N_1-1)\Delta C_{w1}]} = \frac{(2N_1-1)}{8(N_1-1)} \cdot \frac{1+2(N_1-1) \frac{\Delta C_{w1}}{C_{0w1}}}{1+(N_1-1) \frac{\Delta C_{w1}}{C_{0w1}}} < \frac{1}{4} \tag{36}$$

Dla uzwojenia zewnętrznego (rys. 3a) wykonanego jak na rys. 3b efekt zmniejszenia wartości pojemności pasożytniczej jest większy, gdyż uzwojenie to ma większą powierzchnię, a tym samym większe wartości pojemności międzywarstwowych.

Wartości pojemności C_{0wn} można mierzyć klasycznymi metodami po przecięciu połączeń pomiędzy kolejnymi warstwami uzwojenia (w transformatorze przeznaczonym do badań typu).

Na przebiegi dynamiczne w układach energoelektronicznych może wpływać energia gromadzona w obu uzwojeniach (rys. 4). W takim przypadku w całkowitej pojemności należy uwzględnić pojemności obu uzwojeń sprowadzone na jedną stronę transformatora.



Rys. 4. Pojemności pasożytnicze transformatora

Fig. 4. Parasitic capacitance of the transformer

$$C_{eq1} = C_1 + \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 C_2 \quad (37)$$

Pojemność pomiędzy warstwami uzwojenia można zmniejszyć poprzez zastosowanie przekładek izolacyjnych (zwiększenie odległości) o możliwie małej wartości przenikalności dielektrycznej.

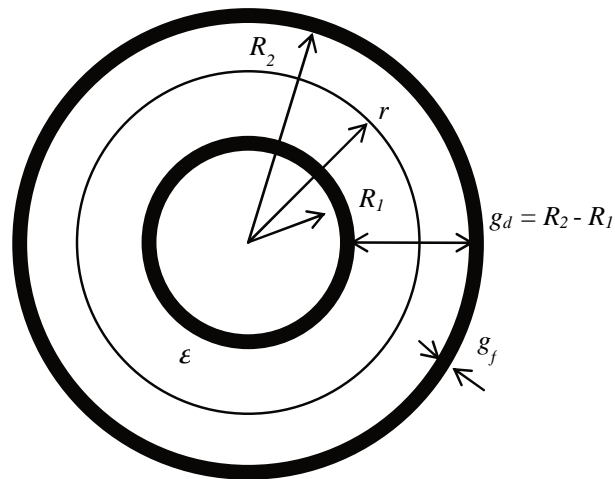
1.4. Pojemność wzajemna uzwojeń i pojemność doziemna

Pojemności międzyuzwojeniowa C_m i pojemność doziemna (do rdzenia) jest klasyczną pojemnością pomiędzy dwoma odizolowanymi powierzchniami przewodzącymi odizolowanymi dielektrykiem. Wartości tych pojemności mogą być łatwo mierzone. Wartości tych pojemności są proporcjonalne do wartości powierzchni zewnętrznej uzwojeń i przenikalności dielektrycznej ich izolacji, a odwrotnie proporcjonalne do odległości (grubości dielektryka).

2. Pojemność własna uzwojenia wykonanego folią

2.1. Pojemność kondensatora cylindrycznego

Transformatory i dławiki dla urządzeń energoelektronicznych, ze względu na cenę miedzi, coraz częściej wykonuje się aluminium. Dla uzyskania dużego upakowania uzwojenia, minimalizacji gabarytów i masy rdzenia magnetycznego, uzwojenia takie wykonuje się z folii aluminiowej. Dla poprawnej pracy układów energoelektronicznych, pracujących przy wysokiej częstotliwości impulsów prostokątnych, należy minimalizować pojemności pasożytnicze.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny przez kondensator cylindryczny

Fig. 5. The cross section of the cylindrical capacitor

Wewnątrz przestrzeni pomiędzy cylindrami wypełnionej dielektrykiem o przenikalności ε , korzystając z prawa Gaussa, można zapisać:

$$E2\pi rl = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (38)$$

przy czym:

$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, ε_r – przenikalność względna,

ε_0 – przenikalność próżni ($\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m)

Stąd natężenie pola elektrycznego E na powierzchni bocznej walca o długości l i promieniu r ($R_1 < r < R_2$), wywołane przez ładunek równomiernie rozłożony na powierzchni walców, ma wartość:

$$E = \frac{Q}{2\pi l \varepsilon r} \quad (39)$$

Napięcie pomiędzy okładkami:

$$U = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{2\pi l \varepsilon r} dr = \frac{Q}{2\pi l \varepsilon} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi l \varepsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (40)$$

Pojemność kondensatora:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi l \epsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi l \epsilon}{\ln \frac{R_1 + g_d}{R_1}} = \frac{2\pi l \epsilon}{\ln \left(1 + \frac{g_d}{R_1} \right)} \quad (41)$$

Funkcję $\ln(1+x)$ dla $-1 < x \leq 1$ można rozwinąć w szereg Maclaurina:

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^n = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \quad -1 < x \leq 1 \quad (42)$$

Z rys. 5 wynika, że:

$$R_2 = R_1 + g_d \quad (43)$$

przy czym: g_d – grubość jednorodnego dielektryka.

$$\ln \left(1 + \frac{g_d}{R_1} \right) \approx \frac{g_d}{R_1} \quad (44)$$

Oznacza to, że pojemność kondensatora cylindrycznego, dla małej wartości grubości dielektryka, w odniesieniu do promienia jego wewnętrznej okładki można obliczać jak dla kondensatora płaskiego.

$$C \approx \frac{2\pi l \epsilon R_1}{g_d} \quad (45)$$

2.2. Pojemność pasożytnicza uzwojenia foliowego umieszczonego na kolumnie o przekroju kołowym

Wielowarstwowe uzwojenie wykonane z folii o grubości g_f z izolacją o grubości g_d (do karkasu cewki przylega folia izolacyjna) i nawinięte na walcu o promieniu R , jest swoim kształtem zbliżone do spirali Archimedesesa o równaniu $r = R + a\varphi$ i o wartości współczynnika $a = (g_d + g_f) / 2\pi$.

Wartość pojemności pomiędzy warstwami takiego uzwojenia (w n warstwie dielektryka) można wyznaczyć zakładając, że składa się ono z wielu zwojów cylindrycznych (45). Promień zewnętrzny walca wewnętrznego ma wartość $R_{1n} = R + n(g_d + g_f)$, a promień wewnętrzny cylindra zewnętrznego $R_{2n} = R + n(2g_d + g_f)$.

Pojemność w jednej warstwie dielektryka ma wartość:

$$C_n = \frac{2\pi l \varepsilon (R + n(g_f + g_d))}{g_d} \quad (46)$$

Pomiędzy warstwami uzwojenia o N zwojach występuje różnica napięcia o jednakowej wartości równej:

$$U_n = \frac{U}{N} \quad (47)$$

W polu elektrycznym jednej warstwy takiego uzwojenia gromadzona jest energia pola elektrycznego o wartości:

$$W_n = \frac{1}{2} C_n U_n^2 = \frac{\pi l \varepsilon (R_1 + n(g_d + g_f))}{g_d} \left(\frac{U}{N} \right)^2 \quad (48)$$

Całkowita energia gromadzona w uzwojeniu ma wartość:

$$\begin{aligned} W_N &= \sum_{n=1}^{N-1} W_n = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\pi l \varepsilon [R_1 + n(g_d + g_f)]}{g_d} \left(\frac{U}{N} \right)^2 = \\ &= \frac{\pi l \varepsilon}{g_d} \left(\frac{U}{N} \right)^2 \sum_{n=1}^{N-1} [R_1 + n(g_d + g_f)] = \\ &= \frac{\pi l \varepsilon}{g_d} \left(\frac{U}{N} \right)^2 \left[R_1 (N-1) + (g_d + g_f) \frac{(N-1)^2}{2} \right] = \\ &= \frac{N-1}{N^2} \cdot \frac{\pi l \varepsilon}{g_d} U^2 \left[R_1 + (g_d + g_f) \frac{N-1}{2} \right] \quad (49) \end{aligned}$$

Energię o takiej wartości, przy napięciu U , gromadzi kondensator o pojemności C_N :

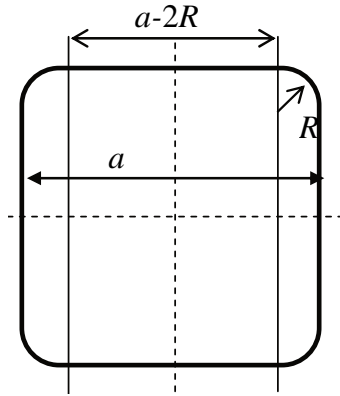
$$W_N = \frac{1}{2} C_N U^2 = \frac{N-1}{N^2} \cdot \frac{\pi l \varepsilon}{g_d} U^2 \left[R_1 + (g_d + g_f) \frac{N-1}{2} \right] \quad (50)$$

Stąd wartość pasożytniczej pojemności uzwojenia:

$$C_N = 2 \frac{N-1}{N^2} \cdot \frac{\pi l \varepsilon}{g_d} \left[R_1 + (g_d + g_f) \frac{N-1}{2} \right] \quad (51)$$

2.3. Pojemność uzwojenia wykonanego na rdzeniu o przekroju kwadratowym

Na rys. 6 przedstawiono przekrój poprzeczny takiego rdzenia z zaznaczonymi wymiarami.



Rys. 6. Przekrój kwadratowy kolumny rdzenia transformatora

Fig. 6. Square cross-section column of the transformer core

Pojemność warstwy uzwojenia jest sumą pojemności 4 kondensatorów płaskich o powierzchni okładek $S = (a - 2R)l$ oraz kondensatora cylindrycznego o długości l i o promieniach dla n warstwy: wewnętrznym $R_{1n} = R + n g_f$ i zewnętrznym $R_{2n} = R + n(g_f + g_d)$.

$$C_n = 4 \cdot \frac{\varepsilon(a-2R)l}{g_d} + \frac{2\pi l \varepsilon(R+n(g_d+g_f))}{g_d} \quad (52)$$

Na każdym zwoju występuje napięcie o takiej samej wartości:

$$U_n = \frac{U}{N} \quad (53)$$

Pomiędzy warstwami uzwojenia (w n warstwie dielektryka) jest gromadzona energia o wartości:

$$\begin{aligned} W_n &= \frac{1}{2} C_n U_n^2 = \\ &= \frac{1}{2} \left[4 \frac{\varepsilon(a-2R)l}{g_d} + \frac{2\pi l \varepsilon(R+n(g_d+g_f))}{g_d} \right] \frac{U^2}{N^2} = \\ &= \frac{\varepsilon l}{g_d} \left[2(a-2R) + \pi(R+n(g_d+g_f)) \right] \frac{U^2}{N^2} \end{aligned} \quad (54)$$

Całkowita energia gromadzona w uzwojeniu ma wartość:

$$\begin{aligned} W_N &= \sum_{n=1}^{N-1} W_n = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\varepsilon l}{g_d} \left[2(a-2R) + \pi(R+n(g_d+g_f)) \right] \cdot \frac{U^2}{N^2} = \\ &= \frac{\varepsilon l}{g_d} \frac{U^2}{N^2} \sum_{n=1}^{N-1} \left[2(a-2R) + \pi(R+n(g_d+g_f)) \right] = \\ &= \frac{\varepsilon l}{g_d} \frac{U^2}{N^2} \left[(2a - (4-\pi)R)(N-1) + \frac{(N-1)^2}{2} \pi(g_d+g_f) \right] = \\ &= \frac{\varepsilon l}{g_d} \frac{U^2}{N^2} (N-1) \left[(2(a-2R) + \pi R) + \frac{(N-1)}{2} \pi(g_d+g_f) \right] \end{aligned} \quad (55)$$

Energię o takiej wartości, przy napięciu U , gromadzi kondensator o pojemności C_N :

$$W_N = \frac{1}{2} C_N U^2 = \frac{\epsilon l}{g_d} \frac{U^2}{N^2} (N-1) \left[(2a - (4 - \pi)R) + \frac{(N-1)}{2} \pi (g_d + g_f) \right] \quad (56)$$

Stąd:

$$C_N = \frac{(N-1)}{N^2} \frac{2\epsilon l}{g_d} \left[(2a - (4 - \pi)R) + \frac{(N-1)}{2} \pi (g_d + g_f) \right] \quad (57)$$

Z zależności (57) wynika, że wartość pojemności pasożytniczej uzwojenia foliowego (o zdefiniowanych: szerokości, wymiarze bazowym karkasu i przenikalności dielektrycznej warstwy izolacyjnej) jest odwrotnie proporcjonalna do liczby zwojów i grubości warstwy izolacyjnej.

Przykład:

Uzwojenie transformatora: 60 zwojów folii Al o grubości $g_f = 0,2$ mm szerokości $l = 60$ mm na karkasie o przekroju kwadratowym o boku $a = 30$ mm (z narożnikami z okrąglonymi o promieniu $R = 3$ mm) izolowanej folią Mylar (DuPoint) o grubości $g_d = 0,05$ mm.

Grubość uzwojenia $G = 60 \times (0,2 + 0,05)$ mm = 15 mm

Dla: $N = 60$, $l = 60$ mm, $a = 30$ mm, $R = 3$ mm, $g_d = 0,05$ mm, $g_f = 0,2$ mm, $\epsilon_r = 3,3$ otrzymuje się:

$$C_N = \frac{(60-1)}{60^2} \frac{2 \cdot 8,854187817 \cdot 10^{-12} \cdot 3,3 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{0,05 \cdot 10^{-3}} \left[(2 \cdot 30 - (4 - \pi)3) + \frac{(60-1)}{2} \pi (0,2 + 0,05) \right] 10^{-3} =$$

$$= \frac{59 \cdot 8,854187817 \cdot 10^{-12} \cdot 6,6 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 0,05} [48 + 3\pi + 29,5\pi \cdot 0,25] = 92,62 \cdot 10^{-12} \approx 93 \text{ pF}$$

Dla folii o przenikalności względnej $\epsilon_r = 1,6$ otrzymuje się: $C_N = 45$ pF.

Przykładowe parametry folii izolacyjnych:

Mylar® A

Electrical Total thickness	50 μm
Dielectric strength	8 kV
Dielectric constant (AC 50 Hz, 25 °C)	3,3
Dielectric loss factor (AC 50 Hz, 25 °C)	0,0025

Specific volume resistance (25 °C) Ω/m	10¹⁸
Specific surface resistance Ω/m	10¹⁶
Specific surface resistance $\Omega/m 10^{12}$ CTI	1
NOMEX 140 50 μm	
Dielectric strength AC rapid rise(1) 17 (kV/mm) Full wave impulse(2) 39 (kV/mm)	
Dielectric constant(3) at 60 Hz	1,6
Dissipation factor(3) 60 Hz (x10-3)	4

Literatura

- [1] Biela J., Bortis D., Kolar J. W.; Analytical Modeling of Pulse Transformers for Power Modulators; 1-4244-0019-8/06/\$25.00 ©2006 IEEE
- [2] Biela J., Kolar J. W.: Using Transformer Parasitics for Resonant Converters – A Review of the Calculation of the Stray Capacitance of Transformers; IAS 2005, 0-7803-9208-6/05/\$20.00 © 2005 IEEE
- [3] Bortis D., Biela J., Ortiz G. and Kolar J.W.; Design Procedure for Compact Pulse Transformers with Rectangular Pulse Shape and Fast Rise Times; 978 -1-4244-7129-4/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [4] Hai Yan Lu, Jian Guo Zhu, and S. Y. Ron Hui: Experimental Determination of Stray Capacitances in High Frequency Transformers; IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 18, NO. 5, SEPTEMBER 2003
- [5] <http://www.synflex.de/en/produkte/?id=18&areaid=flaechenisolierstoffe>
- [6] Sikora R., Teoria Pola Elektromagnetycznego, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997, wydanie trzecie zmienione, str. 83–119 str. 68–77, 104–113
- [7] Zahn M., Pole Elektromagnetyczne, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1989,

PARASITIC CAPACITANCE of TRANSFORMERS and CHOKS WIRINGS

Summary

Parasitic capacitance transformers and reactors used in pulsed power electronic systems influence the shape of the pulse. To predict the shape of the pulse must know the value of the parasitic capacitance depending on the geometry of the pulse transformer or choke. The article presents the analytical expressions for the parasitic capacitance winding made wire and folia.

Keywords: parasitic capacitance of pulse transformers and chokes, foils winding

DOI: 10.7862/re.2015.7

Tekst złożono w redakcji: luty 2015

Przyjęto do druku: kwiecień 2015