ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: ELEKTRYKA z. 71 Nr kol. 656

Mirosław JELENIEWICZ

Wyższa Szkoła Inżynieryjna
w Zielonej Górze

WPŁYW RÓWNOLEGŁEGO ŁĄCZENIA PRZEWODÓW NA WŁASNOŚCI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE NAWOJÓW MULTITIFILARNYCH

Streszczenie. Omówiono własności częstotliwościowe uzwojeń multifilarnych transformatorów stosunkowych, w których dla zmniejszenia rozrzutu parametrów zastosowano równoległe łączenie dwu lub więcej przewodów. Przedstawiono model teoretyczny takiego uzwojenia w postaci wieloprzewodowej linii długiej połączonej skośnie. Podano wyrażenia umożliwiające wprowadzenie odpowiednich poprawek uwzględniających częstotliwościową zależność błędów podziału napięcia.

1. Wprowadzenie

Uzwojenia dokładnych transformatorów stosunkowych wykonuje się najczęściej jako multifilarne [1], [5]. Parametry poszczególnych przewodów nawoju multifilarnego nie są jednak idealnie wyrównane [4] co prowadzi do powstania błędów określenia stosunków napięć [6].

Jedną z metod wyrównania parametrów nawoju jest łączenie równoległe dwu lub więcej przewodów. Według danych literaturowych [5] przy równoległym łączeniu dwóch przewodów rozrzuty np. pojemności mogą być zmniejszone do ok. 20-30% pojemności średniej, a przy łączeniu trzech przewodów nawet do 1 - 2% pojemności średniej. Podkreśla się przy tym, że równoległe łączenie przewodów zmniejsza wypadkowe rezystancje i indukcyjności rozproszenia sekcji uzwojenia stosunkowego.

Powstaje tu jednak pytanie, jak zmienią się własności częstotliwościowe transformatorów z tego typu uzwojeniami. W dostępnej literaturze problem ten nie był dotychczas poruszany. Stąd też wydaje się celowym przedstawienie w niniejszej publikacji próby rozwiązania tego problemu w oparciu o teorię wieloprzewodowego skośnika [2].

2. Model teoretyczny nawoju multifilarnego

Przedstawiona w pracy 2 teoria skośnika dotyczy torów wieloprzewodowych, które mogą tworzyć jednokrotne lub wielokrotne pętle. Takim torem jest także nawój multifilarny. Jeśli założymy, że przewody nawoju są nierozróżnialne pod względem elektrycznym to nieoznaczona macierz admitancyjna takiego nawoju jest identyczna z macierzą podaną w pracy [2] lub [3].

Załóżmy, że ogólną liczbę przewodów n podzielimy na q grup po p przewodów każda (t.j. $n = pq$), jak to pokazano na rys. 1a. W takim przypadku odpowiednią macierz admitancyjną można znaleźć z macierzy wg [2] przez dodawanie do siebie odpowiednich wierszy i kolumn. Po odpowiednich obliczeniach macierz admitancyjną nawoju wg rys. 1a można przedstawić w sposób podany w tabeli 1, gdzie podano również zależności elementów tej macierzy od parametrów jednostkowych nawoju.

Jeśli poszczególne grupy przewodów połączymy szeregowo, otrzymamy wieloprzewodowy skośnik zwarty [2] pokazany na rys. 1b. Skośnik ten stanowi model teoretyczny uzwojenia multifilarnego, w którym poszczególne sekcje zawierają po p równolegle połączonych przewodów. Odpowiednią macierz admitancyjną, podaną w tabeli 2, bez trudu obliczyć można z macierzy podanej w tabeli 1.

Wszystkie elementy macierzy admitancyjnej skośnika mogą być określone np. eksperymentalnie w sposób podany w pracy [2].

W oparciu o wyliczenia zawarte w pracy [3] wykazać można, że dla dostatecznie niskich częstotliwości, przy których $|\Gamma_1| \ll 1$, rozkład napięć na zaciskach skośnika z rys. 1b wyraża się (z dokładnością dostateczną dla celów praktycznych) zależnościami:

$$\frac{U_D}{U_1} = D + \Delta_D \tag{1}$$

$$\Delta_D \approx \Gamma_1^2 \frac{q^2}{12} (2D^3 - 3D^2 + D) \tag{2}$$

gdzie:

U_D - napięcie na zacisku skośnika odpowiadającemu nominalnemu podziałowi D,

U_1 - napięcie wejściowe,

D - nominalny podział napięcia równy wielokrotności 1/q,

Δ_D - błąd podziału napięcia na odpowiednim zacisku skośnika.

Tabela 1

$[Y]_w = \frac{p}{q}$

1	2 ...	q	q+1	1+2 ...	2q	
(q-1)B+F	-B+F	-B+F	-(q-1)D-F	D-F	D-F	1
-B+F	(q-1)B+F	-B+F	D-F	-(q-1)D+F	D-F	2
						. . .
-B+F	-B+F	(q-1)B+F	D-F	D-F	-(1-1)D-F	q
-(q-1)D-F	D-F	D-F	(q-1)B+F	-B+F	-B+F	q+1
D-F	-(q-1)D-F	D-F	-B+F	-B+F	-B+F	q+2
						. . .
D-F	D-F	-(q-1)D-F	-B+F	-B+F	(q-1)B+F	2q

gdzie:

$$B = \frac{1}{Z_{f_1} \cdot \mathrm{th}\,\Gamma_1}, \qquad D = \frac{1}{Z_{f_1} \cdot \mathrm{sh}\,\Gamma_1}, \qquad F = \frac{1}{2\, Z_{f_0}\, \mathrm{th}\,\frac{\Gamma_0}{2}}$$

$$\Gamma_0 = \sqrt{z_0 + (n-1) z_m\, y_0}\; l \qquad Z_{f_0} = \sqrt{\frac{z_0 + (n-1) z_m}{y_0}} \qquad \Gamma_1 = \sqrt{(z_0 - z_m)(y_0 + n\, y_w)}\; l$$

$$Z_{f_1} = \sqrt{\frac{z_0 - z_m}{y_0 + n\, y_w}}$$

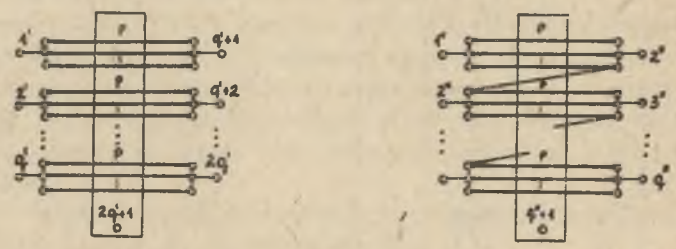
z_0, z_m, y_0, y_w - parametry jednostkowe uzwojenia multifilarnego

Tabela 2

$[Y]_m = \frac{p}{q}$

1	2	3	4 ...	q	
(q-1)B+F	-B-(q-1)D	D-B	D-B	D-B	1
-B-(q-1)D	2(q-1)B+D	-2B-(q-2)D	2(D-B)	2(D-B)	2
D-B	-2B-(q-2)D	2(q-1)B+D	-2B-(q-2)D	2(D-B)	3
D-B	2(D-B)	-2B-(q-2)D	2(q-1)B+D	2(D-B)	4
D-B	2(D-B)	2(D-B)	2(D-B)	2(q-1)B+D	q

Oznaczenia takie jak w tablicy 1.



a) b)

Rys. 1

Można też znaleźć wyrażenie na admitancję wejściową skośnika przy biegu jałowym:

$$Y_i \approx \frac{1}{12} \cdot \frac{p}{q} \cdot \left[(q^2-1)(Y_o + n\,Y_w) + \frac{1}{Z_o + (n-1)Z_m} \right] \qquad (3)$$

gdzie:

Y_o, Y_w, Z_o, Z_m = $(y_o, y_w, z_o, z_m)\,l$

$n = pq$

l - długość uzwojenia mulfifilarnego,

Z_o, Z_m, y_o, y_w - parametry jednostkowe uzwojenia mulfifilarnego.

Na podstawie powyższych wyrażeń można określić własności częstotliwościowe uzwojeń multifilarnych.

Dla wysnucia praktycznych wniosków celowym będzie wyróżnienie dwóch przypadków:

a) gdy liczba sekcji jest stała i równa q, a interesuje nas wpływ liczby połączonych równolegle przewodów,

b) gdy ogólna liczga przewodów n=pq jest stała, a należy dobrać liczbę sekcji q.

Rozważmy kolejno oba te przypadki.

3. Wpływ liczby łączonych równolegle przewodów

Zagadnienie wpływu liczby łączonych równolegle przewodów na własności częstotliwościowe nawoju multifilarnego odpowiada sytuacji, gdy liczba sekcji jest narzucona, a pozostaje jedynie kwestia wyrównania parametrów nawoju.

Z wyrażenia (2) wynika, że w takim przypadku zmieniającym się składnikiem jest jedynie współczynnik propagacji Γ_1, który określony jest wyrażeniem:

$$\Gamma_1(n) = \sqrt{(z_o - z_m)\left[y_o + n\, y_w(n)\right]}\; l \tag{4}$$

Na ogół spełniona jest nierówność $y_o \ll y_w$, wobec czego:

$$\Gamma_1(n) \cong \sqrt{n}\; \sqrt{(z_o - z_m)\; y_w(n)}\; l = \sqrt{n}\, \Gamma(n) \tag{5}$$

$$\Delta_D \cong \Gamma^2(n)\; p\, \frac{q^3}{12}\, (2D^3 - 3D^2 + D) \tag{6}$$

Wynika stąd, że błędy podziału napięcia rosną proporcjonalnie do liczby połączonych równolegle przewodów. W wyrażeniu (6) występuje jednak czynnik Γ^2 (n) uzależniony od całkowitej liczby przewodów n przede wszystkim przez zależność średniej pojemności C_w, która maleje przy wzroście liczby przewodów na skutek wzajemnego ich ekranowania. Na rys. 2 przedstawiono wyznaczoną praktycznie zależność średniej pojemności jednostkowej od liczby przewodów, dla kilku średnic przewodu emaliowanego typu DNEs (przy 0,2 mm przewód typu DNEul).

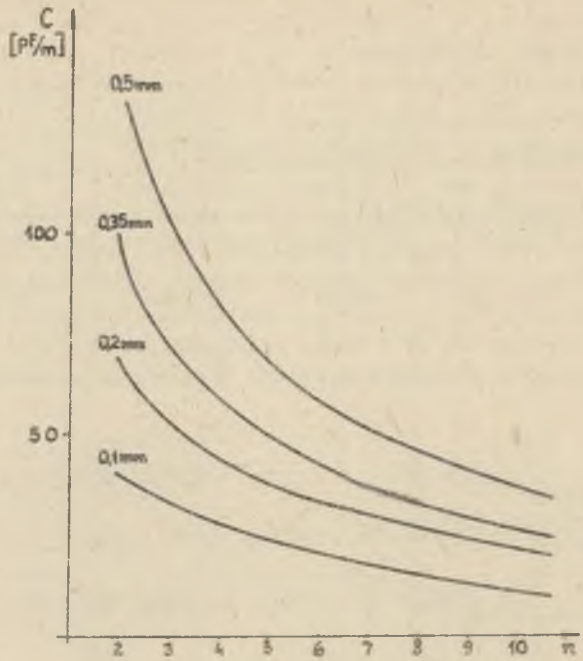
W ostatecznym efekcie p-krotny wzrost błędów można traktować jako wartość graniczną.

Przyjmując podobne założenia:

$$Y_o \ll Y_w \approx j\omega C_w \tag{7}$$

oraz (przy silnym sprzężeniu magnetycznym):

$$Z_o \approx Z_m \approx j\omega L_m \tag{8}$$



Rys. 2

można znaleźć pulsację, przy której admitancja wejściowa osiąga minimum ($Y_i \approx 0$):

$$\omega_o = \frac{1}{p} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{q\sqrt{q^2-1}\,\sqrt{C_w L_m}} \tag{9}$$

Przy wzroście liczby przewodów połączonych równolegle rezonans występuje przy niższych częstotliwościach. Przy częstotliwościach wyższych od rezonansowej admitancja wejściowa transformatora ma charakter pojemnościowy i jej moduł szybko rośnie ze wzrostem częstotliwości, co może być przyczyną powstania dodatkowych błędów.

4. Wpływ liczby sekcji

Problem wyboru liczby sekcji występuje szczególnie jasno przy układach wymagających stałego przełożenia. Np. nominalny podział D = 0,2 można uzyskać, albo na drugim odczepie przy szeregowym połączeniu dziesięciu przewodów (q=10, p=1), albo też na pierwszym odczepie przy równoległym połącze-

niu po dwa przewody i szeregowym w pięć sekcji (q=5, p=2). W obu przypadkach ogólna liczba przewodów n=pq=10.

W takiej sytuacji współczynnik propagacji $\Gamma_1(n)$ pozostaje stały niezależnie od liczby sekcji i z wyrażenia (2) wynika wprost, że błąd na danym odczepie rośnie z kwadratem liczby sekcji. Wynika więc stąd, że znacznie korzystniejszym jest zmniejszenie liczby sekcji nawet przy stałej ogólnej liczbie przewodów.

Dla $q^2 \gg 1$ wyrażenie (9) można przekształcić:

$$\omega_0 \approx \frac{1}{q} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{n\sqrt{C_w T_m}} \tag{10}$$

Podobnie więc jak w przypadku rozważanym w rozdz. 3, pulsacja rezonansowa zmienia się odwrotnie proporcjonalnie tym razem do liczby sekcji. Ewentualne skutki pozostają oczywiście takie same jak poprzednio.

5. Zakończenie

Przedstawione rozważania wynikają wprost z własności nawojów multifilarnych traktowanych jako skośniki o parametrach rozłożonych. Własności te były przedmiotem wielu eksperymentów, które generalnie potwierdziły słuszność przyjętych założeń. W trakcie zbierania materiałów do niniejszej publikacji przeprowadzono taki eksperyment dla nawoju o n=12. Uzyskano wyniki potwierdzające podstawowe tezy przedstawionych wyżej rozważań. Jednak zastosowana metoda badania błędów przekładni (z wykorzystaniem mostka transformatorowego BM 433) i zakres częstotliwości, w którym eksperyment przeprowadzono (0,15-5 MHz) na tyle odbiegają od codziennej praktyki, że zrezygnowano z przedstawienia danych liczbowych.

Prezentowany model teoretyczny nawoju multifilarnego zakłada idealne wyrównanie parametrów poszczególnych przewodów. Jest to dość znaczne uproszczenie przy pojedynczych przewodach. Natomiast dla p=2, a jeszcze bardziej dla $p \geq 3$, założenie takie wydaje się w pełni uzasadnione. Celowym jest jednak uwzględnienie w dalszych pracach wpływu niesymetrii na własności częstotliwościowe nawojów.

LITERATURA

[1] Hill J.J., Miller A.P.: A seven-decade adjustable-ratio inductively-coupled voltage divider with 0,1 part per million accuracy, Proc.IEE. 109B, 1962.

[2] Jeleniewicz M.: Teoria skośnika wieloprzewodowego. Materiały I Krajowej Konferencji "Teoria obwodów i układy elektroniczne", Podlesice 1977.

[3] Jeleniewicz M.: Rozkład napięć w nawoju multifilarnym. Zeszyty Naukowe WST., Elektryka (w druku).

[4] Joers R.R.: Rascziot i opriedielenije paramietrow multifilarnych obmotok. Trudy Tallinskogo Politiechniczieskogo Instituta, No 334, 1972.

[5] Karandiejew K.B. (pod red.): Transformatornyje izmieritielnyje mosty. Energia Moskwa 1970.

[6] Skubis T.: Źródła błędów autotransformatorowych indukcyjnych dzielników napięcia. Zeszyty Naukowe Pol.Sl., z. 55, Gliwice 1976.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДОВ НА ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИФИЛЯРНОЙ ОБМОТКИ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются частотные свойства мультифиляриой обмотки соотносительных трансформаторов. Приводится теоретическая модель обмотки в виде многопроводной удлиненной линии связанной косе. Приведены выражения, которые позваляют учесть частотную зависимость ошибок разделения напряжения.

INFLUENCE OF PARALLEL CONNECTION OF WIRES ON FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MULTIFILAR WINDINGS

S u m m a r y

This article deals with the frequency characteristics of multifilar windings of ratio transformers, in which for reduction of parameters scatter, the parallel connection of two or more wires is used. Atheoretical model of such winding, in the form of multiple line connected is presented askew. The expressions for adequate corrections, taking account of frequency dependency of voltage division errors are given.