

# Projektowanie cewek bezrdzeniowych – cz. II

Mirosław Łukiewski

**Elhand Transformatory jest producentem bezrdzeniowych elementów indukcyjnych typu EP1 oraz EP3. Artykuł przedstawia podstawowe parametry techniczne bezrdzeniowych elementów indukcyjnych.**

## Pojemność własna cewek powietrznych

Parametrami technicznymi cewki powietrznej, oprócz indukcyjności własnej i wzajemnej, są również rezystancja oraz pojemność uzwojenia. Na wypadkową pojemność własną cewki składają się elementarne pojemności występujące między poszczególnymi zwojami oraz między każdym ze zwojów a pozostałymi zwojami uzwojenia.

Pojemność cewki jednowarstwowej cylindrycznej jest proporcjonalna do średnicy cewki i stopniowo maleje ze wzrostem długości cewki.

$$C_o \approx \frac{2 + 4\xi^2 + \frac{1}{4\xi^2}}{10 + 16\xi^2 + \frac{3}{4\xi^2}} \quad (1)$$

gdzie:  $\xi = b/D$  – parametr zależny od średnicy  $D$  i długości cewki  $b$  [1].

Cewki jednowarstwowe najmniejszą pojemność,  $C_o = 1,1$  m, uzyskują, gdy parametr  $\xi = 0,5$ . Oddziaływanie uziemienia na pojemność własną cewki uwzględnia się, wprowadzając mnożnik:

$$\varepsilon_m = 1 + \varepsilon_x \frac{\pi\delta}{b} \quad (2)$$

gdzie:  $\varepsilon_x$  – przenikalność dielektryczna;  $\delta$  – grubość izolacji;  $b$  – długość cewki [1].

Pojemność cewki wielowarstwowej jest większa od pojemności cewki jednowarstwowej, a jej pojemność rośnie proporcjonalnie do długości cewki.

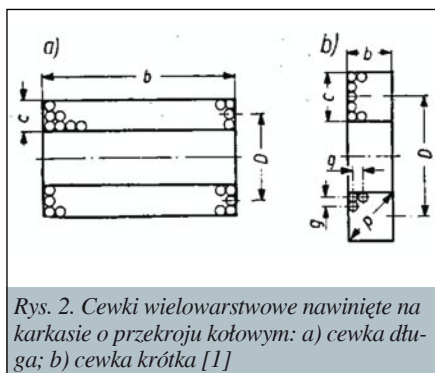
$$C_o \approx \frac{1}{m^2} (C_k + C_a) + \frac{m-1}{m^2} \cdot \frac{D \cdot b}{3,6 \cdot g_w} \quad (3)$$

gdzie:  $m$  – ilość warstw cewki;  $g_w$  – efektywna odległość między warstwami;  $D, b$  – średnica i długość cewki;  $C_k$  – pojemność wyznaczona z zależności (1)



Rys. 1. Trójfazowy powietrzny element indukcyjny w trakcie prób EP3-2 mH/540 A/6 kV

i (2) przy założeniu, że  $\varepsilon_r$  jest przenikalnością dielektryczną karkasu;  $C_a$  – pojemność wyznaczona z zależności (1) i (2) przy założeniu, że  $\varepsilon_r$  jest przenikalnością dielektryczną otoczenia [1].



Rys. 2. Cewki wielowarstwowe nawinięte na karkasie o przekroju kołowym: a) cewka długa; b) cewka krótka [1]

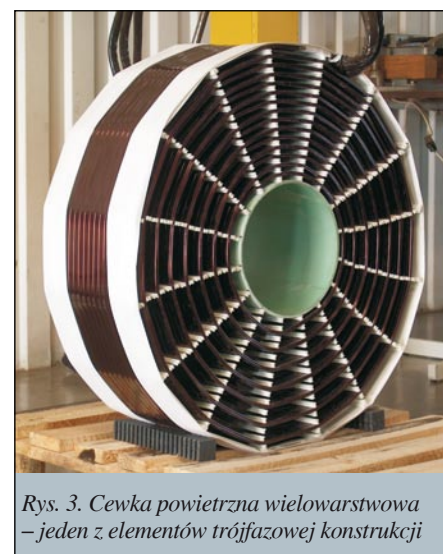
Konstrukcje metalowe, obudowy, ekrany znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie cewki zwiększają pojemność własną cewki, szczególnie gdy odległość od konstrukcji jest porównywalna z wymiarami cewki.

Zmniejszenie pojemności cewki osiąga się przez oddalenie od siebie zwojów i warstw, stosowanie materiałów izolacyjnych o małej przenikalności dielektrycznej, oddalenie cewek od mas me-

talowych oraz sekcjonowanie cewek. Podział uzwojenia na kilka sekcji połączonych szeregowo znacznie zmniejsza wypadkową pojemność cewki. Jeśli cewka ma pojemność  $C_o$ , to po podziale na  $x$  sekcji każda z nich będzie miała pojemność  $C_o/x$ , wypadkowa ich pojemność wyniesie  $C_o/x^2$ . Pomiędzy sekcjami niestety występują pojemności  $C_s$ , które powiększają wypadkową pojemność o wartość  $C_s/x-1$ . Całkowita pojemność  $x$  sekcyjnej cewki wynosi [1]:

$$C_{ox} = \frac{C_o}{x^2} + \frac{C_s}{x-1} \quad (4)$$

gdzie:  $x$  – ilość sekcji cewki;  $C_o$  – pojemność cewki przed podziałem na sekcje;  $C_s$  – pojemność między sekcjami [1].



Rys. 3. Cewka powietrzna wielowarstwowa – jeden z elementów trójfazowej konstrukcji

## Straty w cewkach

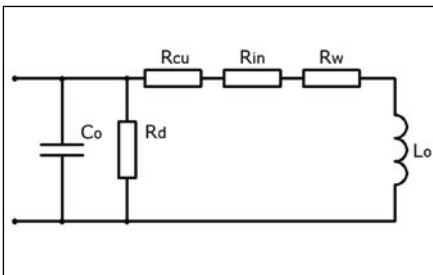
W cewkach bezrdzeniowych występują straty w przewodniku  $R_{cu}$  – najczęściej w miedzi, straty dielektryczne  $R_d$  – w materiale izolacyjnym, straty indukcyjne  $R_m$  – w otoczeniu cewki oraz straty energii wypromieniowanej  $R_w$ , które dla małych częstotliwości są pomijane.

Straty w przewodniku, straty indukcyjne oraz straty energii wypromieniowanej leżą w gałęzi indukcyjnej schematu zastępczego cewki, natomiast straty w dielektryku w gałęzi pojemnościowej.

Straty w przewodach cewek  $R_{cu}$  zawierają straty ciepłe przewodu  $R_p$  potęgowane dodatkowo zjawiskiem nasłórkowości, straty pochodzące od prądów wirowych  $R_w$  indukowanych przez pole magnetyczne zwojów sąsiednich – wpływ sąsiedztwa. Ponadto występuje efekt zwiększenia strat powodowany zakrzywieniem zwojów – straty wiropądowe są tym większe, im większa jest krzywizna zwoju. Łączna oporność strat w przewodach cewki wynosi [1]:

$$R_{cu} = R_p + R_w = R_o \left[ a_n + kB \left( \frac{d}{g} \right)^2 \right] \quad (5)$$

gdzie:  $R_o$  – rezystancja cewki dla prądu stałego;  $a_n$  – współczynnik przyrostu oporności wskutek naskórkowości, zależny od średnicy przewodu i głębokości wnikania;  $B$  – współczynnik przyrostu oporności wskutek sąsiedztwa;  $k$  – współczynnik zależny od kształtu cewki, rodzaju przewodów i nawinięcia;  $g$  – odległość osi przewodów, skok nawinięcia.



Rys. 4. Schematyczna ilustracja parametrów cewki powietrznej

Straty dielektryczne powstają w karkasie i izolacji uzwojenia. Zależą od dobroci i ilości zastosowanych materiałów dielektrycznych, wilgotności powietrza pogarszającej stratność materiału izolacyjnego, natężenia pola elektrycznego oraz częstotliwości [1].

$$R_d = \frac{\omega^3 \cdot L^2 \cdot C_o \cdot tg\delta}{\left[ 1 - \left( \frac{f}{f_r} \right)^2 \right]^2} \quad (6)$$

gdzie:  $\omega$  – pulsacja;  $L$  – indukcyjność cewki;  $C_o$  – pojemność własna cewki;  $tg\delta$  – współczynnik stratności izolacji;  $f$ ,  $f_r$  – częstotliwość i częstotliwość rezonansowa cewki.

Cewki powietrzne wytwarzają silne pole elektromagnetyczne w otaczającej przestrzeni. Prądy wirowe wytwarzane przez pole cewki w pobliskich elementach przewodzących (konstrukcje stalowe, obudowy, okładki kondensatorów, ekrany itp.) powodują powstawanie strat indukcyjnych, Straty te stanowią znaczną część strat dodatkowych. Straty dodatkowe, wynikające z sąsiedztwa elementów lub konstrukcji stalowych, są bardzo trudne do oszacowania [1, 2].

#### Literatura

- [1] ANTONIEWICZ J.: *Poradnik radio- i teleelektryka*, Tomy A, B. PWT. W-wa 1959.
- [2] *Uzwojenia transformatorów energetycznych – budowa i obliczanie*, Praca zbiorowa pod kierunkiem Eugeniusza Jezierskiego, WNT, W-wa 1982.

**Elhand Transformatory**

## Wydarzenia

reklama



nawijać  
trzeba umieć