

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

NAPIĘCIE ZWARCIA W EKSPLOATACJI TRANSFORMATORÓW

SHORT-CIRCUIT VOLTAGE IN THE OPERATION OF TRANSFORMERS

Streszczenie: Transformatory mogą pracować przy dwóch kierunkach przepływu energii. Procentowe wahania napięcia transformatora są dodatnie i ujemne, lecz mieszczą się w przedziale napięcia zwarcia. Transformatory w eksploatacji są narażone na zwarcia awaryjne: symetryczne i niesymetryczne. Udarowa wartość prądu zwarcia zależy od chwili załączenia napięcia. Jeśli napięcie w jednej z faz przechodzi przez zero to wartość udarowa prądu jest maksymalna. Prąd zwarcia generuje siły elektrodynamiczne wzbudzające drgania uzwojenia. Drgania ścierają izolację zwojową i poluzowują mocowanie uzwojeń, a przy n -tym wyłączeniu zwarcia występuje przebicie izolacji zwojowej i awaria transformatora.

Abstract: Transformers can operate in two directions of energy flow. The percentage variation of the transformer voltage is positive and negative, but within the range of the short-circuit voltage. Transformers in operation are exposed to emergency short-circuits: symmetrical and unsymmetrical. The surge value of the short-circuit current depends on the moment of switching on the voltage. If the voltage in one of the phases passes through zero, the surge current is maximum. The short-circuit current generates electrodynamic forces that induce winding vibrations. The vibrations wear down the turn insulation and loosen the fastening of the windings, and at the n -th short-circuit break-in, the turn insulation breaks down and the transformer fails.

Słowa kluczowe: transformatory, napięcie zwarcia, prąd zwarcia, drgania uzwojenia

Keywords: transformers, short-circuit voltage, short-circuit current, winding vibrations

1. Wstęp

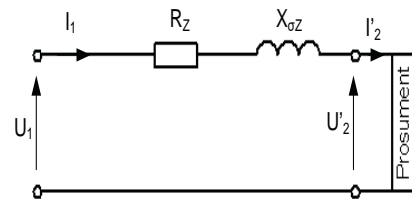
Idealne warunki dla odbiorników energii elektrycznej są gdy napięcie i częstotliwość mają wartość stałą, U_2 i $f = \text{constans}$. Wahania napięcia w sieci elektroenergetycznej występują i w literaturze mają nazwę zmienności napięcia. Zmienność napięcia jest powodowana spadkami napięcia na impedancji sieci i impedancji transformatora. Analizując problematykę zmienności napięcia transformatora w funkcji prądu obciążenia ($\pm I_2$) i $\cos\varphi_2$ założymy impedancję sieci równą zero.

Transformatory w eksploatacji narażone są także na różnego rodzaju zwarcia. Napięcie zwarcia transformatora determinuje prąd zwarcia.

2. Zmienność napięcia

Transformatory dystrybucyjne do których są przyłączeni prosumenci energii elektrycznej, którzy mają zainstalowane odnawialne źródła energii OZE – głównie baterie fotowoltaiczne, pracują przy dwóch kierunkach przepływu energii. Schemat zastępczy transformatora wykorzystany dla interpretacji zmienności napięcia przy dwukierunkowym przepływie energii jest przedstawiony na rysunku 1.

Przy stałej wartości skutecznej napięcia w miejscu przyłączenia transformatora do sieci $U_1 = \text{constans}$,



Rys. 1. Schemat zastępczy transformatora wykorzystany do interpretacji zmienności napięcia

napięcie strony wtórnej U_2 jest funkcją prądu ($\pm I_2$) i $\cos\varphi_2$

$$U_2 = f(\pm I_2, \cos\varphi_2) \quad (1)$$

Napięcia U_1 i U_2 zaznaczone na rysunku 1 i rysunku 2a,b są napięciami fazowymi (dotyczy to tylko wymienionych rysunków).

($+I_2$) oznacza przepływ energii (Pt) od uzwojenia pierwotnego połączonego z siecią elektroenergetyczną o napięciu U_1 do uzwojenia wtórnego i prosumenta, jak zaznaczono na rysunku 1.

($-I_2$) oznacza przepływ energii (Pt) od prosumenta, poprzez uzwojenie wtórne i uzwojenie pierwotne, do sieci elektroenergetycznej.

Zmienność napięcia $\delta u_{\%}$ jest funkcją prądu obciążenia I_2 i $\cos\varphi_2$

$$\delta u_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 = f(I_2, \cos\varphi_2) \quad (2)$$

We wzorze napięcia U_{20} i U_2 są międzyprzewodowe.

Wartość maksymalna zmienności napięcia występuje przy $(I_{2N}, \cos\varphi_Z)$ i jest równa napięciu zwarcia $u_{z\%}$

$$\cos\varphi_Z = \frac{R_z}{\sqrt{R_z^2 + X_{\sigma Z}^2}} \quad (3)$$

$$\delta u_{\max\%} = \frac{U_{20} - U_{2(I_{2N}, \varphi_Z)}}{U_{20}} 100\% = u_{z\%} \quad (4)$$

Na rysunku 2a przedstawiono wykres wskazowy napięć i mocy przy przepływie energii (Pt) z transformatora do prosumenta. Na rysunku 2b przedstawiono wykres wskazowy napięć i mocy przy przepływie energii ($-Pt$) od prosumenta do transformatora. Na rysunkach 2a i 2b napięcie U_{1N} jest napięciem fazowym. W obydwóch kierunkach przepływu energii założono, że prosument obciąża transformator mocą pozorną S w tym mocą czynną

$$P = \pm S \cos\varphi_2 \quad (5)$$

i mocą bierną indukcyjną

$$Q = |S| \sin\varphi_2 \quad (6)$$

To założenie determinuje położenie wskazów prądu na rysunku 2a,b. Przy mocy czynnej P dodatniej wskaz prądu leży w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych (P, Q) , a przy $(-P)$ w czwartej ćwiartce.

Na rysunku 2c przedstawiono wykres $\delta u_{\%}$ w funkcji prądu I_2 przy $\cos\varphi_2$.

Przy przepływie energii (Pt) od U_1 do U_2' , to jest dla prądu $(+I_2')$ i $\cos\varphi_2$ indukcyjne, zmienność napięcia $\delta u_{\%} > 0$, a napięcie $U_2 < U_{20}$. Natomiast przy przepływie energii ($-Pt$) od U_2' , do U_1 , to jest dla prądu $(-I_2')$ i $\cos\varphi_2$ indukcyjne, zmienność napięcia $\delta u_{\%} < 0$, a napięcie $U_2 > U_{20}$. Wartość maksymalna zmienności napięcia jest równa napięciu zwarcia $u_{z\%}$.

Z punktu widzenia zmienności napięcia korzystne jest małe napięcie zwarcia transformatora.

3. Prąd zwarcia

Obliczymy prąd zwarcia transformatora przy zasilaniu napięciem znamionowym $U_{1N} = \text{constans}$ i założeniu impedancji sieci równej zero $Z_{\text{sieci}} = 0$.

Transformator ma zwarte symetrycznie zaciski uzwojenia wtórnego, a na uzwojenie pierwotne załączamy skokowo trójfazowe napięcie sinusoidalne. Bazując na rysunku 1, przy $U_2' = 0$ równanie napięć ma postać

$$u_1(t) = \sqrt{2}U_1(\omega t + \alpha) = R_z i_z + L_{\sigma Z} \frac{di_z}{dt} \quad (7)$$

Rozwiązaniem równania jest przebieg prądu

$$i_z(t) = I_{zm} \sin(\omega t(\alpha - \varphi_z)) + I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_z) e^{-\frac{t}{\tau_z}} \quad (8)$$

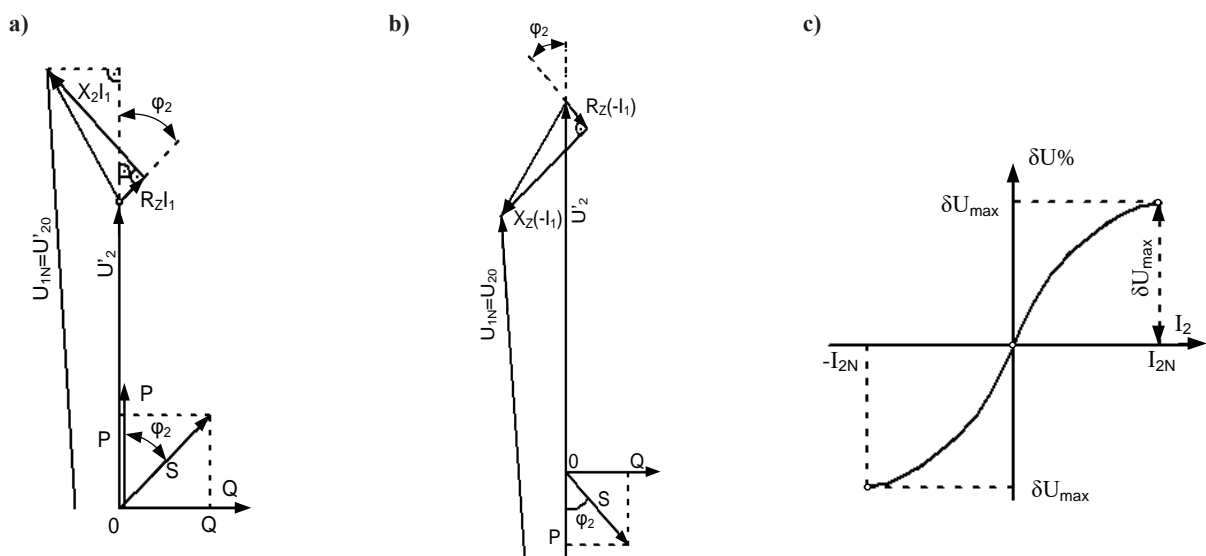
Amplitudę prądu I_{zm} determinuje napięcie zwarcia $u_{z\%}$ transformatora, a φ_z i τ_z parametry schematu zastępczego R_z i $X_{\sigma Z}$

$$I_{zm} = \sqrt{2}I_N \frac{100}{u_{z\%}} \quad (9)$$

$$\varphi_z = \arctg \frac{X_{\sigma Z}}{R_z} \quad (10)$$

$$\tau_z = \frac{X_{\sigma Z}}{\omega R_z} \quad (11)$$

Aby bliżej zapoznać się z przebiegiem prądu zwarcia obliczymy parametry φ_z i τ_z dla transformator 400 kVA, 6 kV. Zgodnie z normą PN-EN 50708-2-1



Rys. 2. Zmienność napięcia transformatora przy $I_2 = \text{variabilis}$ i $\cos\varphi_2 = \text{constans}$: a) przy przepływie energii od U_1 do U_2' , b) przy przepływie energii od U_2' do U_1 , c) wykres $\delta u_{\%} = f(I_2)$

wymieniony transformator ma straty mocy w uzwojeniu: $\Delta P_{CuN} = 3250$ W i napięcie zwarcia $u_{z\%} = 4\%$.

Prąd znamionowy

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 38,49 \text{ A} \quad (12)$$

Rezystancja

$$R_z = \frac{\Delta P_{CuN}}{3I_{1N}^2} = \frac{3250}{3 \cdot 38,5^2} = 0,731 \Omega \quad (13)$$

Impedancja zwarcia

$$Z_z = \frac{u_{z\%}U_{1N}}{\sqrt{3}I_{1N}} \cdot \frac{1}{100} = \frac{4 \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot 38,49} \cdot \frac{1}{100} = 3,6 \Omega \quad (14)$$

Reaktancja zwarcia

$$X_{\sigma z} = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} = \sqrt{3,6^2 - 0,731^2} = 3,52 \Omega \quad (15)$$

Wartość maksymalna ustalonego prądu zwarcia

$$I_{zm} = \sqrt{2} \cdot 38,49 \cdot \frac{100}{4} = 1361 \text{ A} \quad (16)$$

Udarowy prąd zwarcia wystąpi gdy $(\alpha - \varphi_z) = \pm\pi/2$, kąt

$$\varphi_z = \arctg \frac{3,52}{0,731} = \arctg 4,8044 = 77^\circ \quad (17)$$

W przykładowym transformatorze prąd udarowy będzie miał wartość maksymalną gdy kąt $(\alpha = \pm 13^\circ)$, to znaczy gdy napięcie jednej z faz uzyskuje wartość $(\pm 0,2U_{1N})$. Jednak powszechnie przyjęto uważać, że wartość maksymalna prądu udarowego występuje gdy $\alpha \approx 0$ lub π .

Elektromagnetyczna stała czasowa zwarcia

$$\tau_z = \frac{3,52}{314 \cdot 0,731} = 0,015 \text{ s} \quad (18)$$

Składowa niestabilna (aperiodyczna) prądu zwarcia zanika po około $(4\tau_z) = 4 \cdot 0,015 = 0,060$ s, to jest po trzech okresach. Zanikanie składowej aperiodycznej jest szybkie, gdyż indukcyjność uzwojeń w stanie zwarcia jest kilka rzędów mniejsza od indukcyjności stanu jałowego.

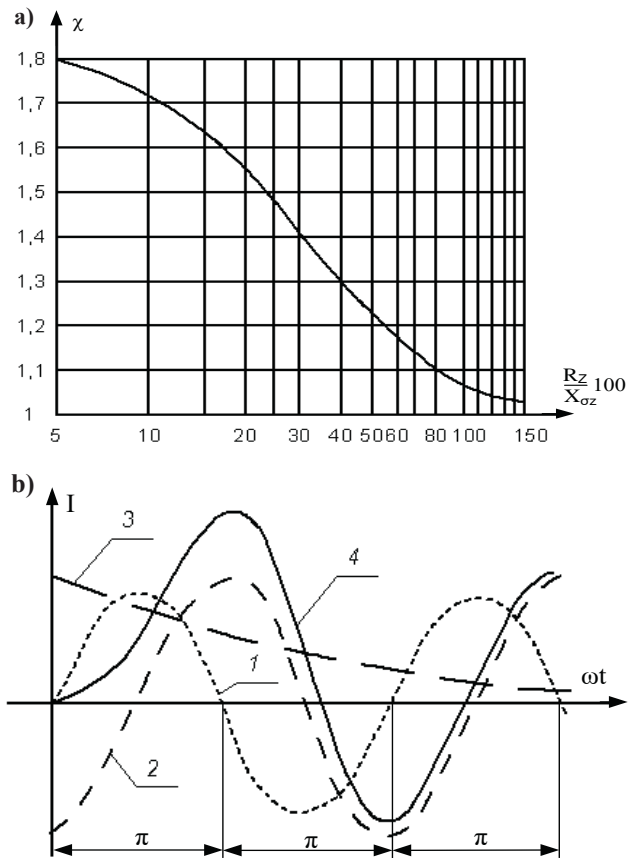
Prąd udarowy, przy $\alpha \approx 0$, wystąpi, gdy składowa aperiodyczna prądu będzie w amplitudzie, to jest po czasie

$$t_0 = \frac{\pi}{\omega} = \frac{3,14}{314} = 0,01 \text{ s} \quad (19)$$

Wartość prądu udarowego zależy od współczynnika tłumienia χ . Wykres $\chi = f(R_z/X_{\sigma z} 100)$ przedstawiono na rysunku 3a. W danym transformatorze $\chi = 1,55$

$$I_{iud} = I_{zm} \left(1 + e^{-\frac{t_0}{\tau_z}}\right) = I_{zm}\chi = 1361 \cdot 1,55 = 2110 \text{ A} \quad (20)$$

Przebiegi napięcia i prądu zwarcia przedstawia rysunek 3b.

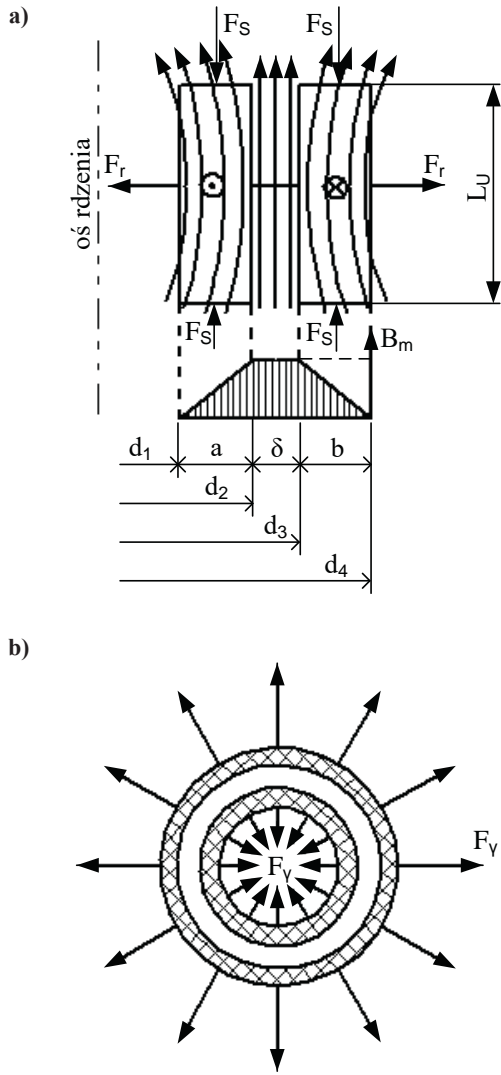


Rys. 3. Prąd zwarcia: a) wykres funkcji $\chi = f(R_z/X_{\sigma z} 100)$, b) przebiegi: 1 – napięcia, 2 – ustalonego prądu zwarcia, 3 – składowej aperiodycznej prądu zwarcia, 4 – prądu zwarcia

Prąd zwarcia transformatora ma dwie składowe: składową ustaloną i składową aperiodyczną. Transformator z małym napięciem zwarcia charakteryzuje się większym ustalonym prądem zwarcia. Udarowa wartość prądu zwarcia zależy od chwili załączenia napięcia. Korzystną chwilą załączenia napięcia jest gdy jedno z napięć fazowych jest w amplitudzie, wówczas składowa aperiodyczna prądu zwarcia nie występuje lub jest mała. Składowa aperiodyczna prądu jest największa gdy w chwili załączenia (powstania) zwarcia sinusoida napięcia w jednej z faz przechodzi przez zero. Prąd zwarcia po czasie 10 ms od chwili zwarcia osiąga wartość maksymalną, wartość udarową. Składowa aperiodyczna prądu znacząco zwiększa wartość udarową prądu zwarcia.

4. Siły elektrodynamiczne generowane w uzwojeniach

Siły elektrodynamiczne powstają w uzwojeniu w którym płynie prąd i uzwojenie jest w polu magnetycznym rozproszenia. Na rys. 4 przedstawiono uzwojenia pierwotne (1) i wtórne (2) koncentryczne, walcowe o jednakowej wysokości l_u sprzężone ze strumieniem rozproszenia. Uzwojenie (1) i (2) mają



Rys. 4. Rozkład sił działających na uzwojenia: a) przekrój wzdłużny uzwojeń, b) przekrój poprzeczny uzwojeń

taką samą wysokość, ten sam przekrój i mają równomiernie rozłożone amperozwoje o tej samej wartości.

Siłę promieniową F_r w zwoju N_{1x} generuje współdziałanie prądu I_1 w tym zwoju z polem magnetycznym o indukcji B_x w którym zwoj N_{1x} znajduje się. B_x jest składową podłużną indukcji. Prądy I_1 i I_2 płynące w uzwojeniach (1) i (2) są przeciwnie zorientowane, co powoduje, że siły promieniowe F_r generowane w uzwojeniach (1) i (2) są równe lecz skierowane przeciwnie, uzwojenia odpychają się. Dla uzwojeń walcowych: wewnętrznego (1) o średnicach d_1, d_2 i uzwojenia zewnętrznego (2) o średnicach d_3, d_4 , siły F_r są rozłożone na obwodzie (πd_x) każdego zwoju N_x . Siła wypadkowa

$$F_r = I_1 \pi \int_0^a N_{1x}(d_1 + 2x) B_x \frac{dx}{a} = I_2 \pi \int_0^b N_{2x}(d_3 + 2x) B_x \frac{dx}{b} \quad (21)$$

Przy czym oś x jest symetralną przekroju uzwojenia, a $x = 0$ leży na średnicy wewnętrznej danego uzwojenia.

Uzwojenie wewnętrzne (1) jest ściskane, a uzwojenie zewnętrzne (2) jest rozciągane.

Największa siła mechaniczna powstanie przy prądzie udarowym $I_1 = I_2' = I_{1ud}$. Indukcja między uzwojeniami, w szczelinie δ , jest równa B_m . W przekroju uzwojenia $a = 1/2(d_2 - d_1)$ indukcja B_x narasta linowo od zera do B_m , a na przekroju $b = 1/2(d_4 - d_3)$ zmniejsza się do zera. Liczba zwojów uzwojenia (1) jest równa N_1 . Przy prądzie udarowym I_{1ud} wartość indukcji B_m wynosi

$$B_m = \mu_0 N_1 \frac{I_{1ud}}{l_u} \rho \quad (22)$$

l_u jest wysokością uzwojenia, a ρ współczynnikiem prof. Rogowskiego [5], $\rho < 1$ uwzględnia zmniejszenie składowej osiowej indukcji B_x . Indukcję średnią B_{sr} przy rozkładzie trójkątnym jak na rysunku 4 opisuje wzór

$$B_{sr} = \frac{1}{2} B_m = \mu_0 N_1 \frac{I_{1ud}}{2l_u} \rho \quad (23)$$

Średnia długość zwoju

$$(\pi d_{sr}) = \pi \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (24)$$

Siła promieniowa przy prądzie udarowym

$$F_{rub} = N_1 I_{1ud} \frac{B_m}{2} \pi \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (25)$$

Po podstawieniu za B_m otrzymamy wzór na siłę promieniową udarową

$$F_{rud} = \mu_0 (N_1 I_{1ud})^2 \pi \frac{d_1 + d_2}{2l_u} \rho \quad (26)$$

Na uzwojenia działają także siły podłużne F_s pochodzące od własnych zwojów uzwojenia. W dwóch przylegających do siebie zwojach kierunek prądu jest taki sam i zwoje te nawzajem przyciągają się. Suma tych sił cząstkowych daje dwie siły podłużne F_s ściskające uzwojenie.

Wzór na siłę ściskającą jest podobny

$$F_{sud} = F_{rud} \frac{\delta'}{2l_u} \quad (27)$$

$$\delta' = \delta + \frac{a + b}{3} \quad (28)$$

Siły promieniowa F_r i siła ściskająca F_s są funkcjami czasu

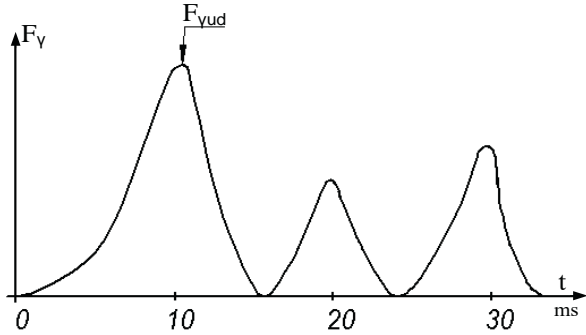
$$F_r(t) = C_r i_{1z}^2 \quad (29)$$

$$F_s(t) = C_s i_{1z}^2 \quad (30)$$

Przy czym

$$i_{1z}(t) = I_{zm} \sin(\omega t (\alpha - \varphi_z)) + I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_z) e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (31)$$

Wykres siły $F_r(t)$ dla przebiegu prądu zwarcia z rysunku 3b przedstawiono na rysunku 5. Transformator z małym napięciem zwarcia charakteryzuje się dużym prądem zwarcia i dużymi siłami udarowymi F_{rud} występującymi w czasie zwarcia.



Rys. 5. Przebieg siły promieniowej działającej na uzwojenie w czasie zwarcia

Transformatory energetyczne mają regulację napięcia przy pomocy zaczepek na jednym z uzwojeń, na rysunku 6 jest to uzwojenie (2). Zwoje z zaczepekami mogą być umieszczone na skraju bądź w środku danego uzwojenia. Zawsze załączony jest tylko jeden z zaczepek, pozostałe zaczepek są wyłączone lecz zajmują miejsce i obniżają aktywną wysokość uzwojenia (2). Przy przepływie prądu powstaje luka w rozkładzie amperozwojów uzwojeń (1) i (2) na wysokości kolumny. Amperozwoje, w przedziale tej luki, wzbudzają pole magnetyczne rozproszenia poprzecznego B_p . Współdziałanie amperozwojów uzwojeń (1) i (2) z rozkładem indukcji B_p generuje siły elektrodynamiczne podłużne F_d działające na uzwojenia (1) i (2). Siły F_d są tak skierowane aby powiększać asymetrię położenia uzwojeń względem siebie. Kierunki działania siły F_d są zaznaczone na rysunku 6.

Wzory na obliczenie siły F_d są następujące [6];

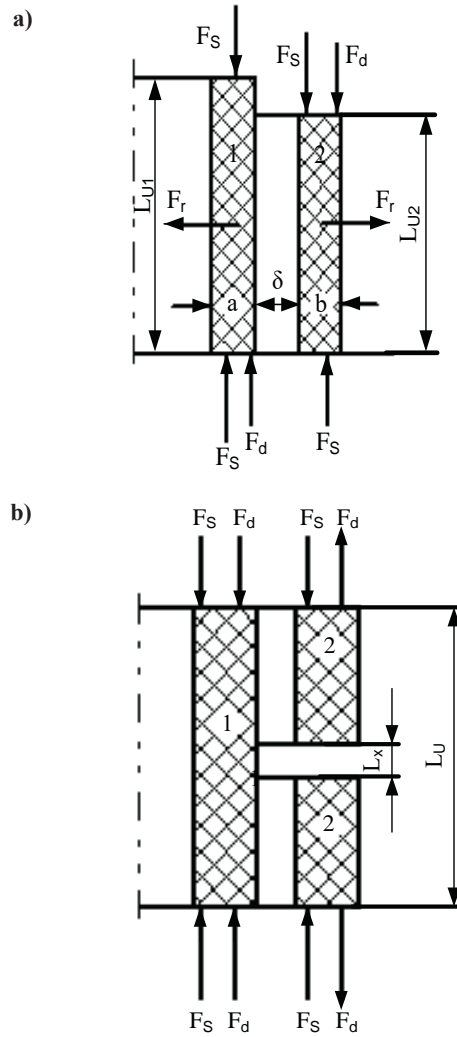
– dla uzwojenia obniżonego, rysunek 6a

$$F_d = F_r \frac{l_1 + l_2}{a + \delta + b} \quad (32)$$

– dla uzwojenia luką w środku, rysunek 6b

$$F_d = F_r \frac{l_x}{4(a + \delta + b)} \quad (33)$$

Oznaczenia podano na rysunku 6. W układzie mocowania uzwojeń do rdzenia są elementy sprężyste o współczynnikach sprężystości k_1 i k_2 i współczynniku tłumienia C_1 i C_2 są to: izolacja międzywarstwowa i międzycewkowa, tuleje izolacyjne między uzwojeniami, olej i śruby dociskające pierścienie elkonowe do uzwojeń. Uzwojenia mają masę m . W uzwoje-



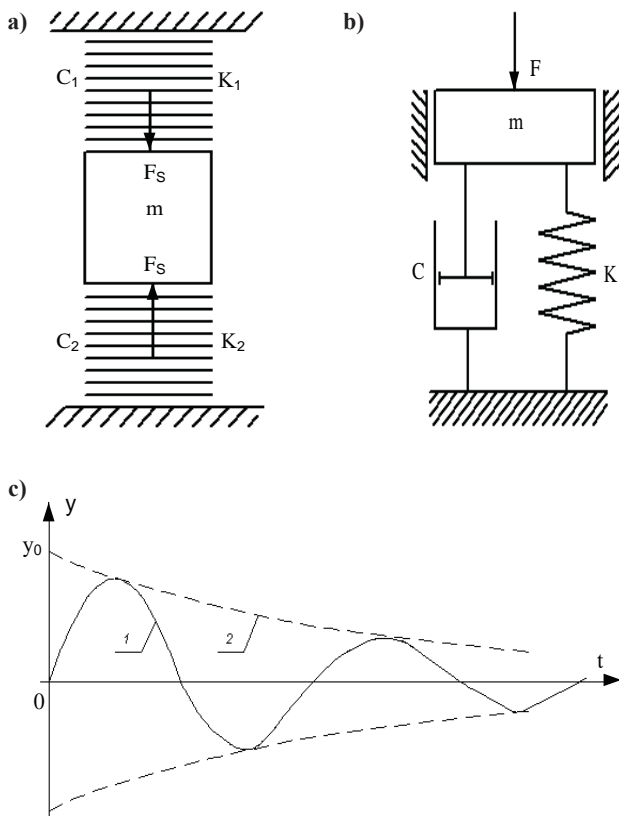
Rys. 6. Uzwojenia (1) i (2) o różnej wysokości: a) zaczepek są na skraju cewki, b) zaczepek są w środku cewki

niach generowane są zmienne siły elektrodynamiczne promieniowe F_r i siły osiowe F_s i F_d . W sumie jest to układ mechaniczny drgający o drganiach osiowych i promieniowych. Model układu drgającego z jednym stopniem swobody pobudzany siłą osiową F jest przedstawiony na rysunku 7. Masa m jest położona na sprężynie o sprężystości K i tłumiku o współczynniku C . Siła F ma składową stałą F_0 i składową zmienną F_- . Składowa stała F_0 powoduje przesunięcie masy m o odcinek drogi y_0 , a składowa zmienna F_- wzbudza drgania $y(t)$ wymuszone. Drgania wymuszone opisuje równanie

$$m\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + ky = F(t) \quad (34)$$

Sprężyna K i tłumik C ograniczają amplitudę drgań. Po wyłączeniu zwarcia siła F zanika. Masa m w dalszym ciągu drga z częstotliwością drgań własny tłumionych. Drogi drgań własnych $y(t)$ opisuje równanie różniczkowe

$$m\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + ky = 0 \quad (35)$$



Rys. 7. Model drgań uzwojenia w czasie zwarcia: a) model fizyczny, b) model obliczeniowy, c) 1 – przebieg drgań po wyłączeniu zwarcia, 2 – tłumienie amplitudy drgań

Rozwiązaniem równania jest funkcja

$$y(t) = y_0 e^{-t/\tau_d} \sin \omega_d t \quad (36)$$

ω_d jest pulsacją drgań własnych, a τ_d mechaniczną stałą czasową tłumienia drgań.

$$\omega_d = \left(\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right)^{0,5} \quad (37)$$

$$\tau_d = \frac{2m}{c} \quad (38)$$

Po zaniku drgań uzwojenie jest w pozycji $y = 0$. Na rysunku 7c przedstawiono przebieg drogi $y(t)$ drgań swobodnych tłumionych.

Przedstawiony model jest układem drgającym z jednym stopniem swobody w osi y . Jest to przykład pokazujący, że po wyłączeniu zwarcia układ jeszcze drga, a czasie drgań izolacja zwojowa jest narażona na naprężenia ściskające. W czasie wyłączania zwarcia na uzwojeniu występują przepięcia

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (39)$$

Wartość maksymalna przepięć zależy od szybkości zaniku prądu zwarcia w uzwojeniu. Drgania uzwojenia plus przepięcia sprzyjają powstawaniu zwarć zwojowych.

Przy zwarcia awaryjnych transformatora najczęściej działa SPZ (samoczynne ponowne załączenie) i jeśli przy pierwszym lub drugim wyłączeniu zwarcia nastąpi przebicie izolacji najczęściej zwojowej, to przy następnym zwarciu transformator ulega awarii.

5. Podsumowanie

Transformatory dystrybucyjne do których są przyłączeni prosumenci energii elektrycznej modą pracować przy dwóch kierunkach przepływu energii. Przy przepływie energii z sieci do prosumentów napięcie na uzwojeniu (2) obniża się wraz ze wzrostem mocy obciążenia, zmienność napięcia jest dodatnia, a przy przepływie energii od prosumentów do sieci napięcie na uzwojeniu (2) wzrasta wraz ze wzrostem mocy, zmienność napięcia jest ujemna. Jeśli pominiemy spadki napięcia w sieci, to procentowe wahania napięcia mieszczą się w przedziale napięcia zwarcia transformatora ($\pm u_{z\%}$). Transformator z małym napięciem zwarcia charakteryzuje się mniejszą zmiennością napięcia. Prosumenci mają większą zmienność napięcia, gdyż dodają się spadki napięcia w sieci.

Transformatory energetyczne w eksploatacji są narażone na zwarcia awaryjne: symetryczne i niesymetryczne. Prąd zwarcia transformatora ma dwie składowe: składową ustaloną i składową aperiodyczną. Transformator z małym napięciem zwarcia charakteryzuje się większym ustalonym prądem zwarcia. Udarowa wartość prądu zwarcia zależy od chwili załączenia napięcia. Korzystną chwilą załączenia napięcia jest gdy jedno z napięć fazowych jest w amplitudzie, wówczas składowa aperiodyczna prądu zwarcia nie występuje lub jest mała. Składowa aperiodyczna prądu jest największa gdy w chwili załączenia (powstania) zwarcia sinusoida napięcia w jednej z faz przechodzi przez zero. Prąd zwarcia po czasie 10 ms od chwili zwarcia osiąga wartość maksymalną, wartość udarową. Składowa aperiodyczna prądu znacząco zwiększa wartość udarową prądu.

Prąd zwarcia generuje siły elektrodynamiczne proporcjonalne do kwadratu prądu. Udarową wartość siły F_{ud} generuje prąd udarowy w kwadracie I_{ud}^2 . Konstrukcja transformatora, w tym mocowanie uzwojeń między sobą i do rdzenia, powinna wytrzymywać zwarcia symetryczne i niesymetryczne. Producent transformatora, zobligowany Umową z odbiorcą, sprawdza wytrzymałość zwarciovą transformatora, zgodnie z normami [2, 4], wykonując najczęściej trzy zwarcia. W czasie wieloletniej eksploatacji transformator jest narażony na zwarcia symetryczne i niesymetryczne. Drgania uzwojenia w czasie zwarć z czasem ścierają izolację zwojową i poluzowują mocowanie uzwojeń, a przy n-tym wyłączeniu zwarcia

występuje przebicia izolacji zwojowej i awaria transformatora.

Literatura

- [1] *Transformatory średniej mocy 50 Hz, o najwyższym napięciu urządzenia nieprzekraczającym 36 kV – Część 1: Wymagania ogólne*, PN-EN-50588-1:2016-04E.
- [2] *Transformatory – Wymagania ogólne, b) specjalne w zakresie: wytrzymałości zwarciowej wykonanej*, PN-EN 60076-1:2011E.
- [3] *Transformatory. Metody badań. Pomiar strat i napięcia zwarcia*, PN-E-04070-09:1981.
- [4] *Transformatory – część 5: Wytrzymałość zwarciowa*, PN-EN 60076-5:2009.
- [5] W. Rogowski, *Über das Streufeld und den Streuinduktionskoeffizienten eines Transformators mit Scheibenwicklung und geteilten Endspulen*, VDI, Mitteilungen über Forschungsarbeiten. 1909, H. 71, s. 1-36.
- [6] С.Б. Васютинский, *Вопросы теории и расчета трансформаторов*, Издательство „Энергия”, 1970.

Autorzy

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec