

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki



Autoreferat Rozprawy Doktorskiej

Analiza przepięć przenoszonych
przez uzwojenia transformatorów energetycznych

mgr inż. Maciej Kuniewski

promotor: dr hab. inż. Jakub Furgał, prof. n.

Kraków, 2013

1. Wprowadzenie

Dążenie do zwiększania ciągłości dostaw energii elektrycznej powoduje, iż szczególna uwaga jest zwracana na takie rozwiązania układów elektroenergetycznych, które do minimum ograniczają prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Duży wpływ na niezawodność pracy układów elektroenergetycznych ma bezawaryjna praca transformatorów energetycznych. Zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających utrzymanie odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych, wynikającej ze spodziewanych narażeń, ma podstawowe znaczenie dla spełnienia tych wymagań. Optymalizacja stosowanych układów izolacyjnych wymaga szczegółowej analizy oddziaływujących na nie narażeń eksploatacyjnych. Do zespołu narażeń eksploatacyjnych, determinujących wymagania wytrzymałości elektrycznej wysokonapięciowych układów izolacyjnych, należą narażenia przepięciowe.

Zespół zróżnicowanych przebiegów przepięciowych, propagujących przez uzwojenia transformatorów energetycznych, narażających układy izolacyjne uzwojeń i urządzeń połączonych z transformatorami pracujących na różnych poziomach napięć, określono mianem przepięć przenoszonych.

Możliwości prowadzenia analizy przepięć przenoszonych przez transformatory na podstawie wyników badań eksperymentalnych są ograniczone, głównie ze względu na wartości maksymalne przepięć i przypadkowy charakter ich występowania. Podstawą analizy narażeń przepięciowych urządzeń w układach elektroenergetycznych są obecnie głównie wyniki symulacji komputerowych zjawisk przejściowych. Wyznaczenie przepięć przenoszonych przez transformatory wymaga stosowania modeli transformatorów uwzględniających zjawiska fizyczne zachodzące w uzwojeniach w warunkach oddziaływania przepięć o zróżnicowanych przebiegach, powstających w układach elektroenergetycznych. Modelowanie transformatorów energetycznych w warunkach szybkozmiennych stanów przejściowych wymaga uwzględnienia mechanizmów zjawisk w złożonych układach elektrycznych RLC o parametrach zależnych od częstotliwości, które stanowią uzwojenia.

Do tej grupy problemów wpisuje się rozprawa doktorska pt. *Analiza przepięć przenoszonych przez uzwojenia transformatorów energetycznych*, stanowiąca rozszerzenie dziedziny analizy przepięć i ochrony przepięciowej w szczególności od przepięć przenoszonych przez transformatory i oddziaływujących na ich układy izolacyjne własne i izolację urządzeń zasilanych przez transformatory, pracujące na różnych poziomach napięć.

Teza rozprawy doktorskiej jest następująca:

- **skonstruowanie wysokoczęstotliwościowego modelu transformatora energetycznego umożliwia rozszerzenie zakresu wykonywanych symulacji i analiz przebiegów przenoszonych i oceny skuteczności ochrony przepięciowej samych transformatorów, jak i urządzeń zasilanych przez te obiekty.**

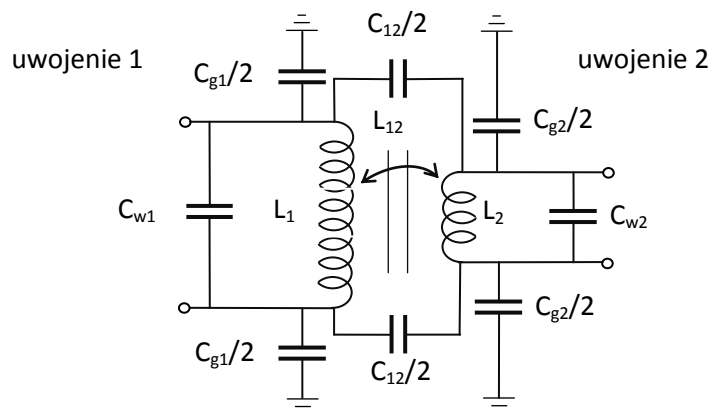
W celu potwierdzenia tezy wykonano symulacje przebiegów przenoszonych o zróżnicowanych przebiegach przez uzwojenia transformatora energetycznego, wykonane z wykorzystaniem opracowanego modelu wysokoczęstotliwościowego zaimplementowanego w programie komputerowym Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (*EMTP-ATP*). Uzyskane wyniki symulacji porównano z obliczeniami, wykonanymi z użyciem modeli transformatorów stosowanych powszechnie do symulacji stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych. Wyniki przeprowadzonych symulacji porównano z wynikami badań eksperymentalnych, wykonanych dla trójfazowego transformatora rozdzielczego.

2. Mechanizm powstawania przebiegów przenoszonych

Przebiegi są przenoszone przez transformatory w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami, a więc sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych.

Przebiegi są przenoszone przez transformatory w wyniku [9]:

- sprzężeń indukcyjnych między uzwojeniami,
- sprzężeń pojemnościowych,
- oscylacji naturalnych obwodu pierwotnego i/lub wtórnego transformatora (rys.2.1).



Rys. 2.1. Schemat zastępczy uzwojeń jednej fazy transformatora: C_{w1} , C_{w2} - pojemności własne odpowiednio uzwojenia 1 i 2, C_{g1} , C_{g2} - pojemności doziemne odpowiednio uzwojenia 1 i 2, C_{12} - pojemność między uzwojeniami 1 i 2, L_1 , L_2 , L_{12} - indukcyjności własne odpowiednio uzwojenia 1 i 2 oraz indukcyjność wzajemna między uzwojeniami

3. Wysokoczęstotliwościowy model transformatorów

Do celów analizy przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatorów energetycznych stosuje się modele wysokoczęstotliwościowe uwzględniające zjawiska zachodzące w transformatorach podczas oddziaływania przebiegów przejściowych przebiegów o dużych stromościach lub zawierających składowe przejściowe o dużych częstotliwościach.

Ogólna zależność między napięciami a prądami na zaciskach transformatora jest zapisana w postaci [11]:

$$I = YU \quad (3.1)$$

gdzie: Y – macierz admitancji transformatora,

U – wektor napięć na zaciskach transformatora,

I – wektor prądów fazowych transformatora.

W przypadku modelowania transformatora trójfazowego dwuuzwojeniowego, równania napięciowo-prądowe zawierają macierz admitancyjną, która zawiera elementy reprezentujące zależności napięciowo-prądowe we wszystkich fazach transformatora i jej wymiar to 6×6 [7]. Na przykład zależności napięciowo-prądowe zawierające macierz admitancyjną dla modelu transformatora n -fazowego mają następującą postać:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{j1} & Y_{j2} & \cdots & Y_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

gdzie: Y_{ii} - suma admitancji uzwojeń dołączonych do węzła i ,

Y_{ji} - admitancja między węzłami i i j ze znakiem ujemnym.

Konstruowanie modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów obejmuje następujące etapy:

- wyznaczenie doświadczalnych charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia transformatora,
- zastąpienie doświadczalnych charakterystyk częstotliwościowych funkcjami wymiernymi w dziedzinie operatorowej,
- określenie struktury oraz parametrów elementów układu zastępczego RLC , realizującego funkcje przenoszenia transformatora [4,7].

Podstawą modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów są **zależności częstotliwościowe funkcji przenoszenia**. Opracowanie modelu transformatora z wykorzystaniem wzoru (3.2) wymaga wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych admitancji uzwojeń transformatora.

Funkcje przenoszenia transformatorów $TF(f)$ są definiowane jako zależności częstotliwościowe ilorazów odpowiednich napięć lub prądów na zaciskach transformatora i napięcia zasilania [1,10]:

$$TF(f) = \frac{X(f)}{Y(f)} \quad (3.3)$$

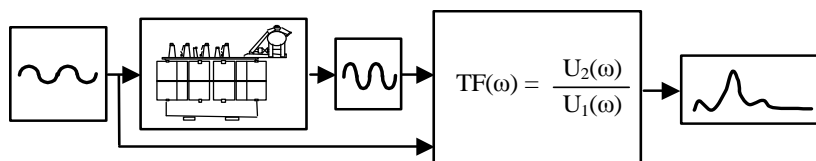
gdzie: $Y(f)$ – napięcie zasilania uzwojenie transformatora,

$X(f)$ – napięcie lub prąd w drugim uzwojeniu lub prąd w uzwojeniu zasilanym.

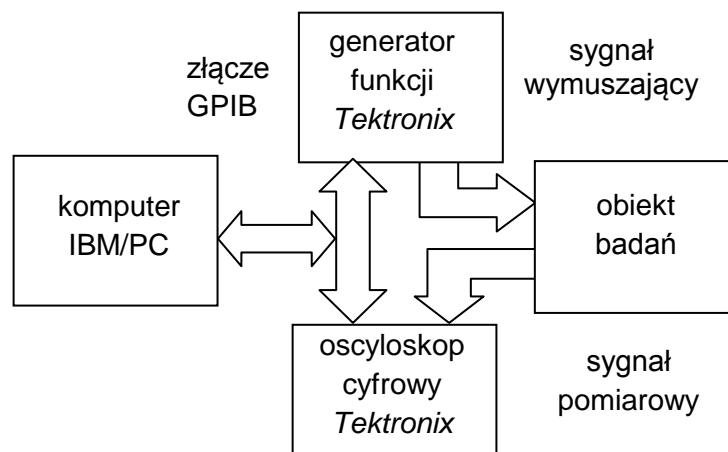
Do wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów są stosowane następujące metody:

- metoda z wymuszeniem krótkotrwałym udarem niskonapięciowym (*Low Voltage Impulse - LVI*),
- metoda z zastosowaniem wymuszenia sinusoidalnego (*Sweep Frequency Response Analysis - SFRA*).

W pracy charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatora wyznaczono metodą z zastosowaniem wymuszenia sinusoidalnego SFRA. Polega ona na jednoczesnym pomiarze wartości skutecznych i przesunięcia fazowego sygnału dla podstawowej harmonicznej, charakteryzujących mierzone prądy oraz napięcia przy zasilaniu jednego uzwojenia napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości (rys. 3.2) [2,3].



Rys. 3.2. Schemat blokowy metody SFRA stosowanej do wyznaczania funkcji $TF(f)$ transformatora



Rys. 3.3. Schemat blokowy stanowiska do rejestracji charakterystyk częstotliwościowych transformatorów metodą SFRA

Do wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów rozbudowano istniejące stanowisko pomiarowe charakterystyk częstotliwościowych o nowe funkcje w celu

umożliwienia rejestracji charakterystyk amplitudowo-fazowych. Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na rysunku 3.3.

Kolejnym etapem opracowania modelu wysokoczęstotliwościowego transformatora jest **dopasowanie zależności teoretycznych do doświadczalnych charakterystyk** transformatora [5]. Jedną z metod implementacji dopasowania zależności częstotliwościowej transformatora jest zastąpienie zmierzonej charakterystyki amplitudowo-fazowej funkcją wymierną w dziedzinie operatora Laplace'a. Podstawą metody jest dopasowanie współczynników wielomianów funkcji wymiernej tak, aby realizowała wyznaczoną charakterystyką obiektu. W praktyce przybliżenie funkcji wymiernej może być realizowane jako stosunek dwóch wielomianów skończonego rzędu:

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m} = \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)} \quad (3.5)$$

gdzie: a_n – współczynniki wielomianu licznika,

b_n – współczynniki wielomianu mianownika,

z_n – zera,

p_n – bieguny.

Funkcja wymierna zapisana w postaci ilorazu dwóch wielomianów (3.5) może być przedstawiona za pomocą sumy ułamków prostych, zawierających residua i bieguny funkcji $f(s)$:

$$TF(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - p_n} + d + sh \quad (3.6)$$

gdzie: c_n – residua,

p_n – bieguny,

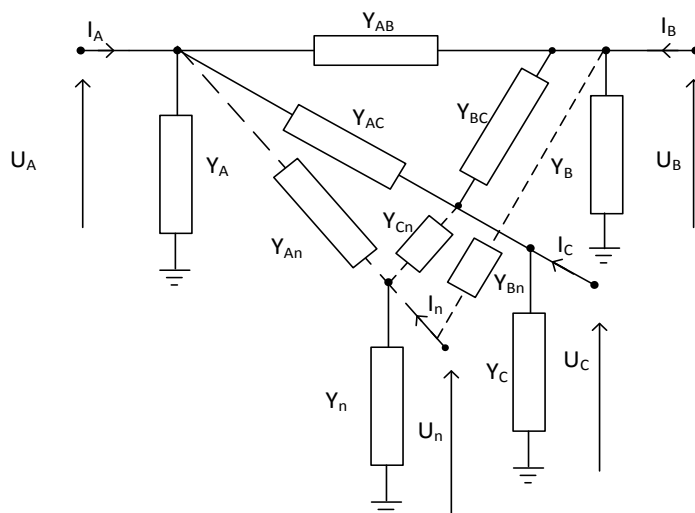
d, h – stałe (liczby rzeczywiste).

Jedną z metod odwzorowania charakterystyk z zespolonymi współczynnikami jest metoda dopasowania ułamków częściowych do posiadanych danych wejściowych z użyciem metod optymalizacyjnych, wykorzystująca dopasowanie wektorowe (Vector Fitting) [6].

W celu opracowania modelu transformatora na podstawie charakterystyk częstotliwościowych funkcji przenoszenia konieczne jest **określenie struktury zastępczego układu RLC** oraz parametrów jego elementów składających się na postać funkcji $f(s)$, reprezentowanej przez poszczególne residua i bieguny z równania (3.6) [8].

Wysokoczęstotliwościowy model wielofazowy transformatora energetycznego jest opracowany z wykorzystaniem równania (3.2), przedstawiającego zależności napięciowo-prądowe dla badanego obiektu. Schemat modelu transformatora

n -fazowego, realizowanego za pomocą czwórników typu π przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Schemat ogólny układu połączeń modelu transformatora n -fazowego bazującego na czwórniku typu π : U_1, \dots, U_N - napięcie strony 1 do N czwórnika, I_1, \dots, I_N - prąd płynący po stronie 1 do N czwórnika, Y_A, \dots, Y_N - admitancja doziemna zacisku A do N , Y_{KN} - admitancja pomiędzy zaciskami K i N

W przypadku doboru wartości elementów układu RLC realizującego poszczególne residua i bieguny admitancji stosuje się zależności przedstawione w załączniku rozprawy. Wyrazy wolne w równaniu (3.6), są realizowane z wykorzystaniem równoległe połączonej rezystancji i pojemności. Każdy z elementów admitancyjnych pokazany na rysunku 3.4 powinien realizować charakterystyki częstotliwościowe zgodnie z opisem do zależności (3.2).

4. Analiza przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatorów

W rozprawie wykonano badania i symulacje, których celem jest analiza przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatorów oraz potwierdzenie postawionej tezy rozprawy.

Badania obejmowały:

- wyznaczanie przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatorów podczas oddziaływania udarów napięciowych prostokątnych o różnych stromościach, modelujących przebiegi napięć pojawiających się podczas działania ograniczników przebiegów,
- wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych przebiegów przenoszonych przez uzwojenia – umożliwiających analizę reakcji transformatora, na składowe oscylacyjne przebiegi o różnych częstotliwościach,
- rejestracje przebiegów przenoszonych podczas załączania transformatora zawierających składowe przejściowe wysokoczęstotliwościowe.

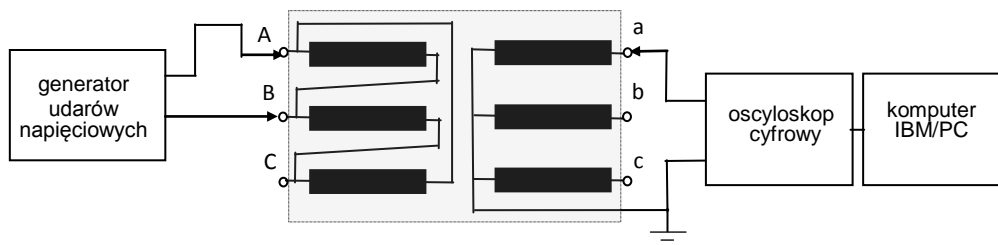
Obiektem doświadczalnym był transformator typu *TNOSCT-250/15,75PNS* produkcji ABB, o mocy znamionowej 250 kVA i napięciu znamionowym 15,75/0,4 kV (rys. 4.1). Transformator został udostępniony do badań przez Centrum Badawcze ABB w Krakowie.



Rys. 4.1. Widok stanowiska doświadczalnego transformatora typu *TNOSCT-250/15,75PNS* o mocy znamionowej 250 kVA i napięciu znamionowym 15,75/0,4 kV

Badania przebiegów przenoszonych powstających, przy oddziaływaniu udarów napięciowych o przebiegach prostokątnych o różnych stromościach narastania, wykonano przy oddziaływaniu udaru na uzwojenie wysokiego napięcia transformatora. Rejestrowano przebiegi przenoszone w uzwojeniu dolnego napięcia U_{dn} . Celem badań było wyznaczenie wpływu stromości udarów napięciowych na przebiegi i wartości szczytowe przebiegów przenoszonych przez transformatory.

Schemat stanowiska do badań przebiegów przebiegów napięciowych wymuszanych przez udary napięciowe o różnych stromościach, zamieszczono na rysunku 4.2.

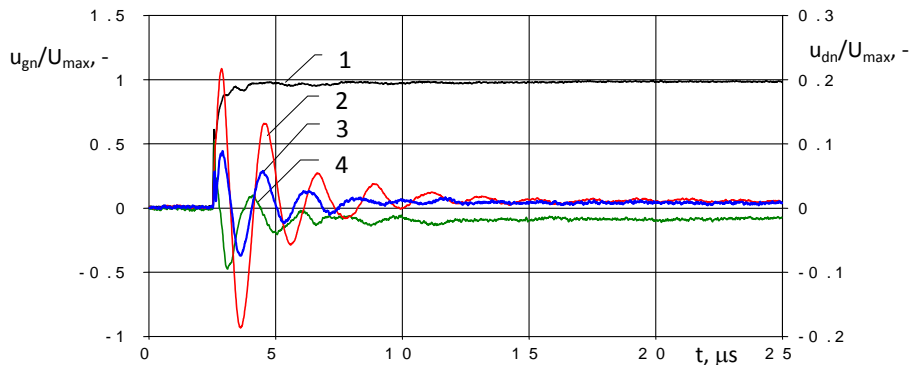


Rys. 4.2. Schemat stanowiska do badań przebiegów napięciowych przenoszonych przez transformator podczas oddziaływania udarów napięciowych o różnych stromościach

Wykonano rejestracje przebiegów fazowych w uzwojeniach górnego napięcia (u_{gn}) i dolnego napięcia (U_{dn}), powstających podczas działania udarów napięciowych o czasach do wartości maksymalnej wynoszących: 5 ns, 100 ns i 700 ns. Przykładowe wyniki badań napięć przejściowych przenoszonych w uzwojeniach dolnego napięcia, odniesione do wartości maksymalnej U_{max} udaru prostokątnego, przedstawiono na rysunku 4.3.

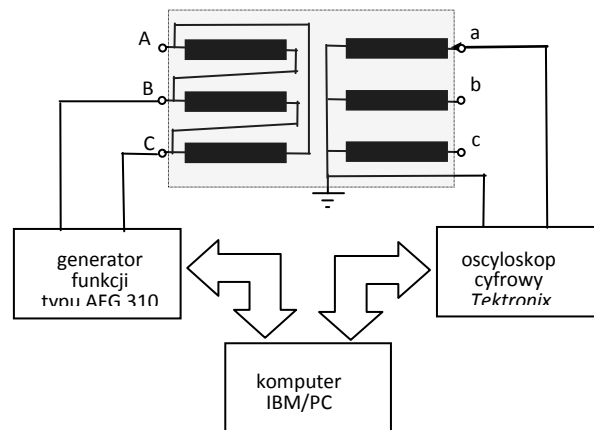
Na podstawie wyników badań przebiegów napięciowych indukowanych w uzwojeniach dolnego napięcia, pojawiających się podczas działania udarów napięciowych o różnych stromościach można stwierdzić, że stromość udaru napięciowego ma wpływ na wartości maksymalne przebiegów przenoszonych. Wraz ze zmniejszaniem się stromości udaru prostokątnego wartości korespondujące z wyższymi harmonicznymi, występującymi w widmie częstotliwościowym udaru ulegają zmniejszeniu. Największe wartości przebiegów przenoszonych w uzwojeniach dolnego napięcia są około czternastokrotnie większe od wartości napięć

wynikających z przekładni. Częstotliwości rezonansowe przebiegów nie ulegają zmianie, i wynoszą ok. 480 kHz



Rys. 4.3. Przebiegi napięć przejściowych przenoszonych przez transformator 250 kVA, 15,75/0,4 kV indukowanych w uzwojeniach 0,4 kV podczas działania udaru napięciowego między zaciskami *AB* o czasach do wartości maksymalnej udaru 5 ns: 1 - udar napięciowy (skala po lewej stronie), 2 - faza *a*, 3 - faza *b*, 4 - faza *c* (skala po prawej stronie)

Badania przebiegów przenoszonych obejmowały, także rejestrację charakterystyk częstotliwościowych napięć między zaciskami wejściowymi uzwojenia górnego i dolnego napięcia. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.4.

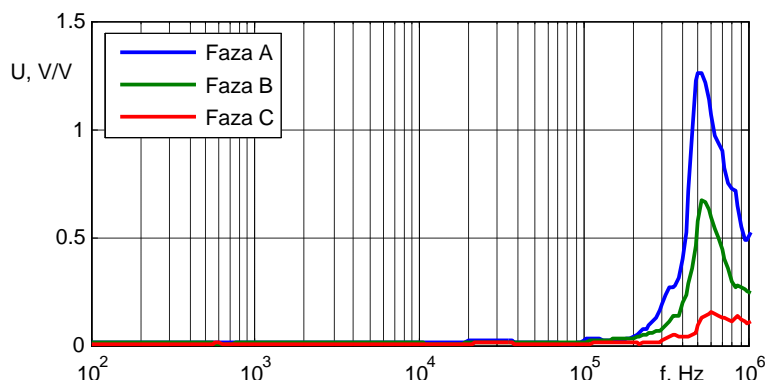


Rys. 4.4. Schemat stanowiska do badań zależności częstotliwościowych przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatorów

Pomiary wykonano z zastosowaniem opracowanego stanowiska pomiarowego do rejestracji zależności częstotliwościowych funkcji przenoszenia transformatorów (rys. 4.4). Wybrane wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych przebiegów przenoszonych w uzwojeniach dolnego napięcia transformatora 250 kVA, 15,75/0,4 kV przedstawiono na rysunku 4.5.

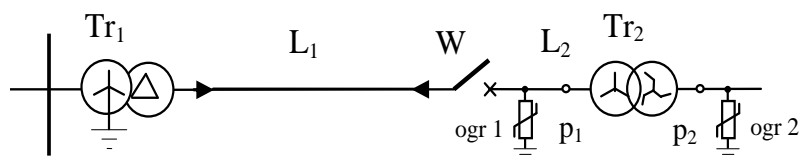
Na podstawie analizy wykresów można stwierdzić, że wartości przebiegów przenoszonych zależą od częstotliwości zawartych w sygnale wymuszającym. Częstotliwości, przy których przebiegi przenoszone w uzwojeniach górnego i dolnego napięcia osiągają maksymalne wartości, są różne. Częstotliwość rezonansowa dla uzwojenia górnego napięcia wynosi około 5 kHz, a dla uzwojenia dolnego napięcia około 500 kHz.

Charakterystyki częstotliwościowe przebiegów indukowanych w uzwojeniach dolnego napięcia, przedstawione na rysunku 4.5, korespondują z przebiegami widocznymi na rysunku 4.3.



Rys. 4.5. Przepięcia przenoszone w transformatorze 250 kVA, 15,75/0,4 kV rejestrowane na zaciskach uzwojenia 0,4 kV (u_{dn}) podczas zasilania uzwojenia 15,75 kV (u_{gn}): zasilanie między zaciskami AB

Wykonano badania przebiegów przenoszonych, powstających w uzwojeniach dolnego napięcia podczas załączania transformatora do sieci 15 kV. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.6.

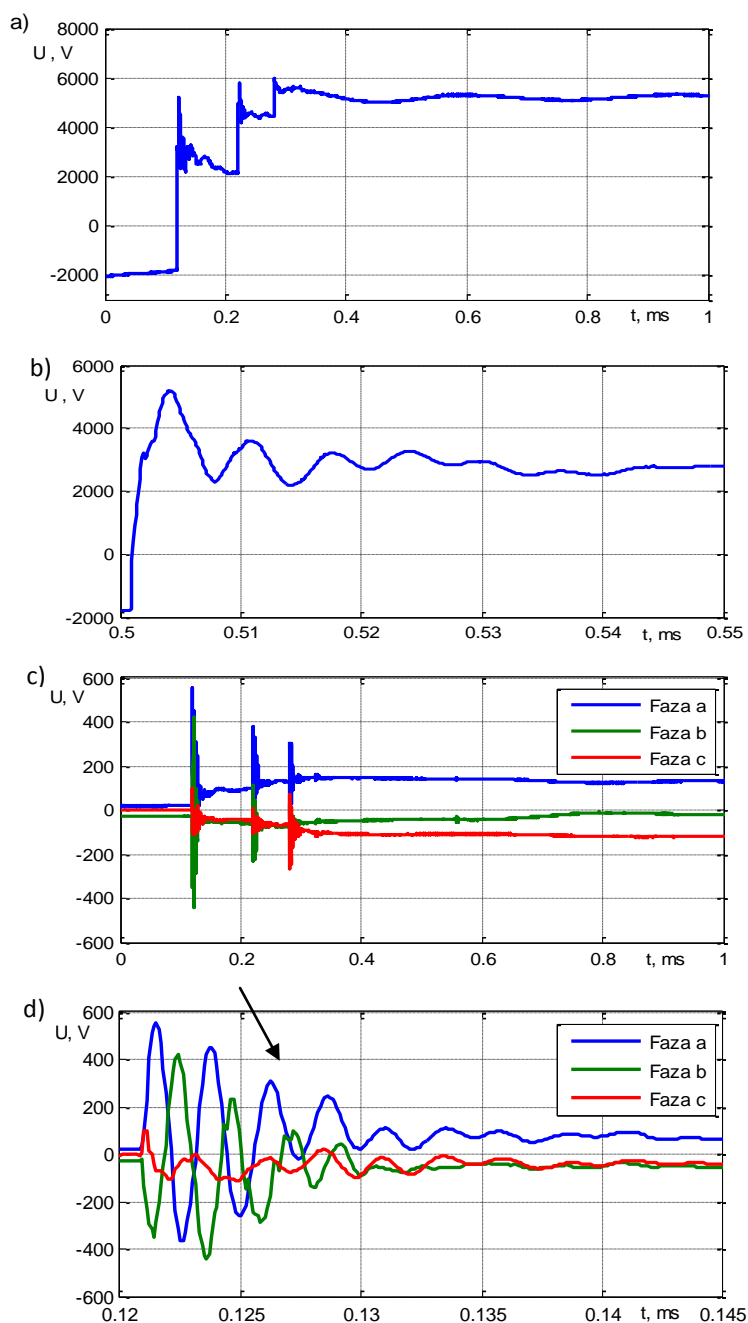


Rys. 4.6. Schemat układu do badań przebiegów łączeniowych przenoszonych przez transformator: Tr_1 - transformator zasilający typu TOC 20/10, L_1 - linia kablowa, L_2 - szynoprzewody o długości 2 m, W - wyłącznik próżniowy, Tr_2 - transformator doświadczalny typu TNOSCT-250/15,75PNS, $ogr1$, $ogr2$ – beziskierkowe ograniczniki napięć, p_1 , p_2 - punkty rejestracji napięć doziemnych

Rejestrowano przebiegi napięć doziemnych w fazie A uzwojenia 15,75 kV oraz w fazach a,b,c w uzwojeniach 0,4 kV podczas załączania transformatora (rys. 4.7). Wartości maksymalne napięć doziemnych na zaciskach uzwojeń 15,75 kV sięgają 1,2-krotnej wartości maksymalnej napięcia zasilania. Współczynnik napięć przenoszonych do uzwojeń niskiego napięcia transformatora wynosi 1,7.

Drugi etap analizy obejmował symulacje komputerowe napięć przenoszonych przez transformator 250 kVA 15,75/0,4 kV wykonane z użyciem modeli transformatorów istniejących w programie EMTP/ATPDraw oraz opracowanego modelu wysokoczęstotliwościowego (rozdział 3). Symulowano:

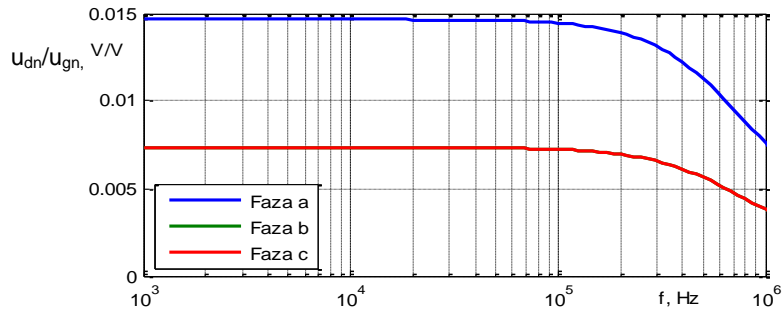
- charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych,
- przebiegi napięć przenoszonych powstające podczas działania udaru prostokątnego,
- napięcia przenoszone podczas załączania transformatora do sieci 15kV
- napięcia przenoszone powstające podczas wyładowań atmosferycznych do zasilających linii napowietrznych.



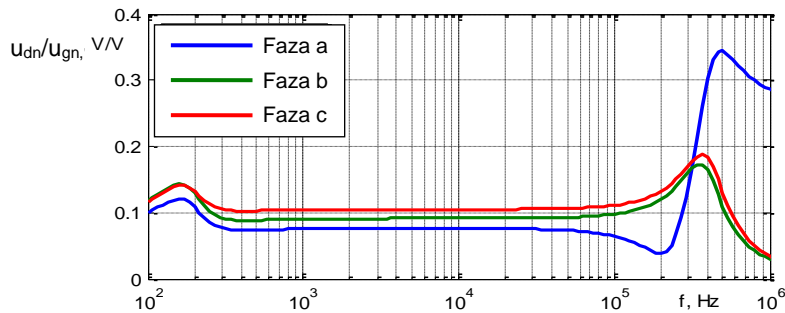
Rys. 4.7. Przebiegi napięć przejściowych przenoszonych przez transformator 250 kVA, 15,75/0,4 kV generowanych w uzwojeniach 0,4 kV podczas załączania transformatora do sieci średniego napięcia:

a,b - przebiegi napięcia doziemnego w fazie A, c,d - przebiegi przepięć przenoszonych doziemnych na zaciskach uzwojeń dolnego napięcia

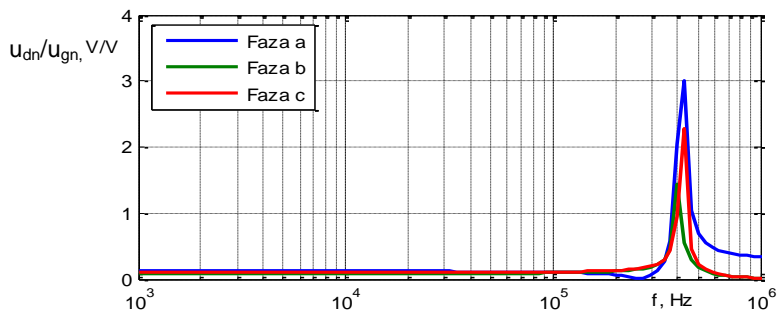
Wyniki obliczeń zależności częstotliwościowych przepięć przenoszonych przez transformator w uzwojeniu 0,4 kV wykonane dla układu przedstawionego na rysunku 4.4 z zastosowaniem programu *EMTP-ATPDraw* w wersji 5.7 p 4. Symulowano przepięcia doziemne w fazach *a,b,c* uzwojeń 0,4 kV generowane podczas oddziaływania sinusoidalnego o częstotliwości zawartej w przedziale od 1 kHz do 1 MHz między zaciskami faz *AB* uzwojenia górnego napięcia. Wyniki symulacji przestawiono na rysunkach 4.8-4.12.



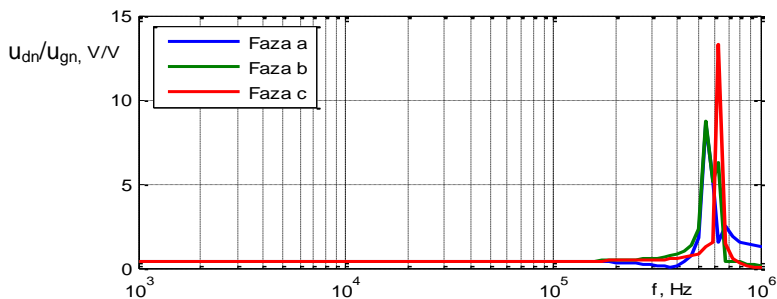
Rys.4.8. Charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniu 0,4 kV transformatora 250 kVA symulowane w programie *EMTP-ATP* z zastosowaniem modelu *BCTRAN* bez uwzględniania pojemności uzwojeń



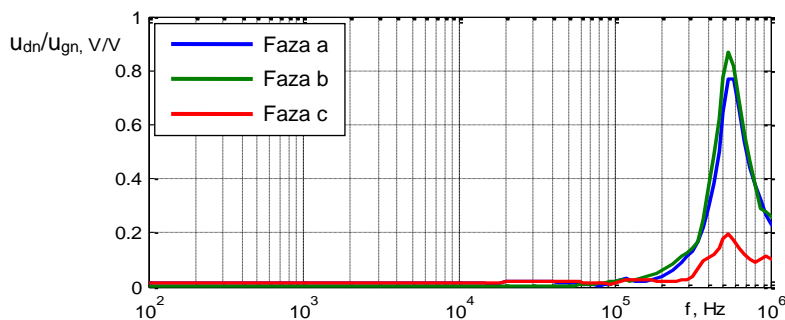
Rys. 4.9. Charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniu 0,4 kV transformatora 250 kVA symulowane w programie *EMTP-ATP* z zastosowaniem modelu *BCTRAN* uwzględniającego pojemnościami uzwojeń



Rys. 4.10. Charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniu 0,4 kV transformatora 250 kVA symulowane w programie *EMTP-ATP* z zastosowaniem modelu *HYBRID* z uwzględnieniem typowych wartości pojemności uzwojeń dla danego typoszeregu transformatorów



Rys. 4.11. Charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniu 0,4 kV transformatora 250 kVA symulowane w programie *EMTP-ATP* z zastosowaniem modelu *HYBRID* z uwzględnieniem pojemności uzwojeń wynikających z konstrukcji transformatora



Rys. 4.12. Wyniki symulacji charakterystyk częstotliwościowych napięć przenoszonych w uzwojeniu 0,4 kV transformatora 250 kVA z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego

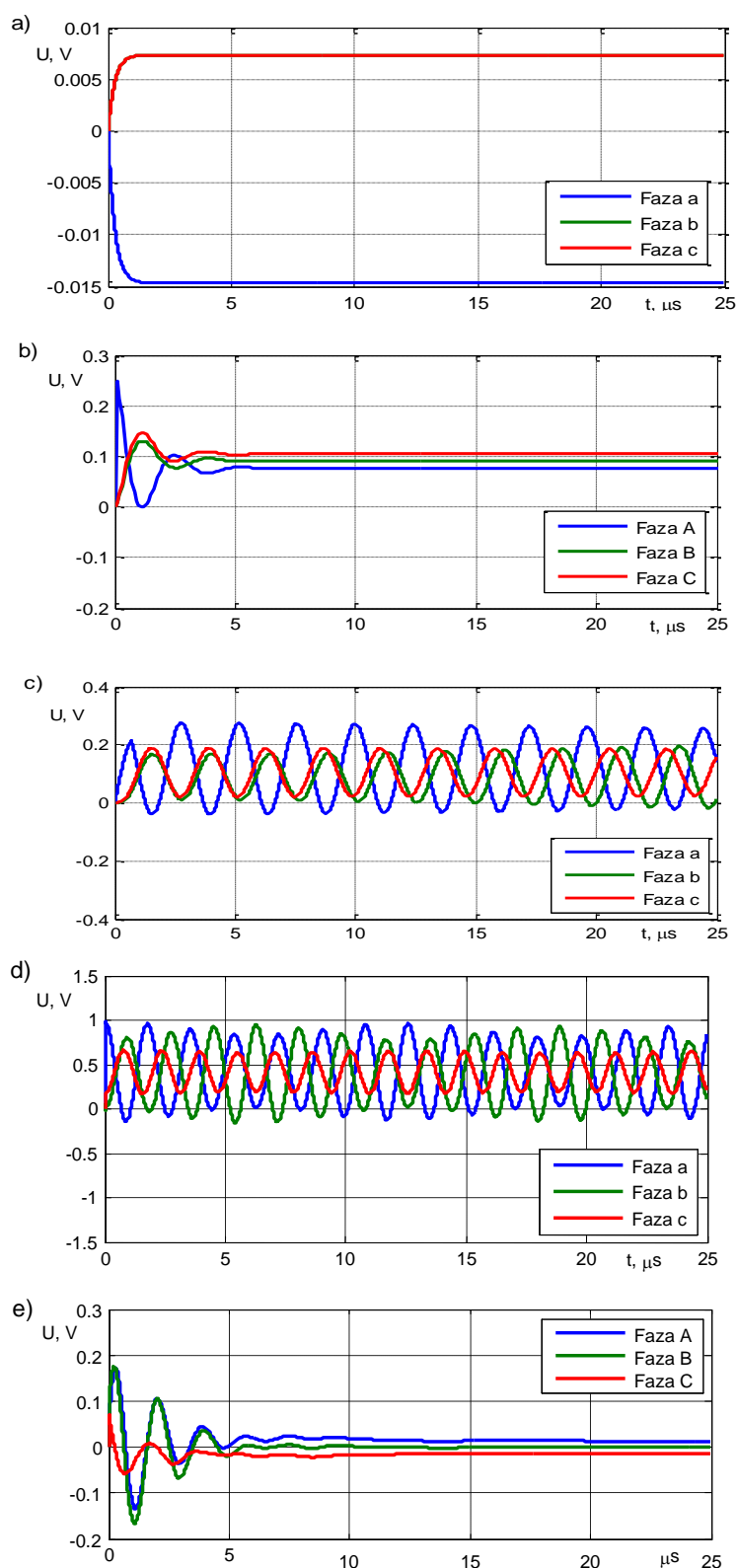
Zależności częstotliwościowe napięć przenoszonych uzyskane po zastosowaniu modelu *BCTRAN*, zakresie częstotliwości do około 100 kHz pokrywają się z wartością przekładni znamionowej. Dla wyższych częstotliwości wartości napięć maleją ze wzrostem częstotliwości (rys. 4.8). Po uwzględnieniu w modelu *BCTRAN* pojemności uzwojeń transformatora, zależności częstotliwościowe napięć przenoszonych zmieniają swój charakter, uwiadcniają się częstotliwości rezonansowe. Napięcia osiągają największe wartości dla częstotliwości w zakresie od około 350 kHz do około 500 kHz (rys. 4.9).

Wartości maksymalne charakterystyk częstotliwościowych napięć przenoszonych przez transformator wykonanych przy użyciu modelu *HYBRID* (rys. 4.10) z uwzględnieniem wartości pojemności uzwojeń typowych dla modelowanego transformatora z programu *EMTP-ATP*, znacznie przekraczają wartości uzyskane z pomiarów i występują dla częstotliwości od około 400 kHz do około 450 kHz. Charakterystyki napięć przenoszonych symulowane z zastosowaniem modelu *HYBRID*, uwzględniającego pojemności uzwojeń wynikające z konstrukcji transformatora (rys. 4.11) osiągają największe wartości wynoszące około 13 p.u. w stosunku do napięcia wymuszającego, dla częstotliwości od 550 kHz do 650 kHz.

Charakterystyki częstotliwościowe napięć przenoszonych symulowanych z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego pokazane na rysunku 4.12 osiągają wartości maksymalne wynoszące około 0,85 p.u. w stosunku do napięcia zasilającego dla częstotliwości 480 kHz. Maksymalna wartość charakterystyki napięć przenoszonych jest najbardziej zbliżona do wartości maksymalnej charakterystyki uzyskanej z pomiarów na rzeczywistym obiekcie (rys. 4.5).

Obliczenia napięć przy zasilaniu udarem prostokątnym wykonano w zamodelowanym układzie z rysunku 4.2. Przebiegi napięć przenoszonych uzyskane z symulacji wykorzystujące modele transformatorów z programu *EMTP/ATPDraw* zamieszczono na rysunku 4.13, symulowane przebiegi z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego przedstawiono na rysunku 4.14.

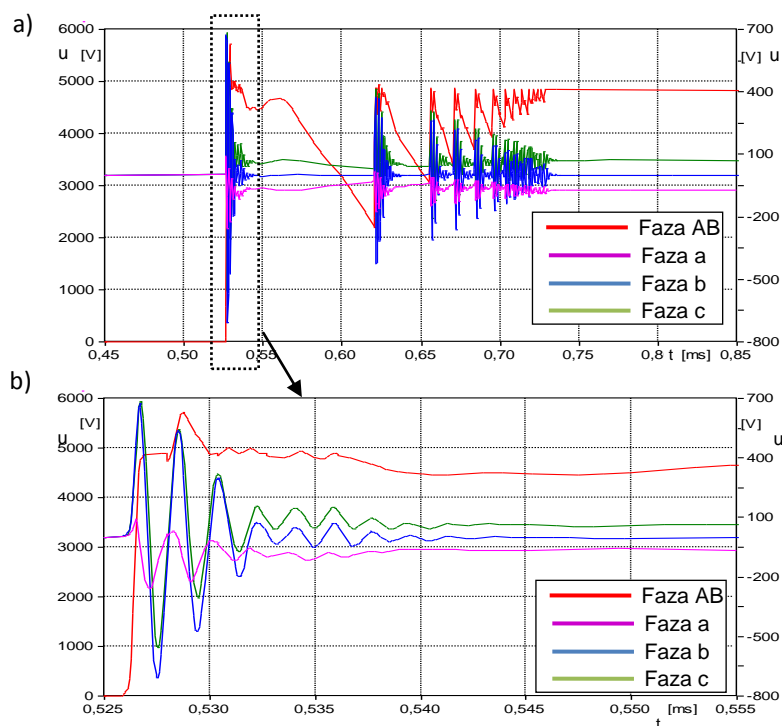
Wyniki symulacji napięć przenoszonych, wykonane z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego, są zbliżone do wyników rejestracji napięć przenoszonych (rys. 4.3).



Rys. 4.13. Przebiegi napięć przejściowych przenoszonych przez transformator 250 kVA, 15,75/0,4 kV w uzwojeniach 0,4 kV dla wymuszenia o czasie narastania 5ns symulowane przy zastosowaniu modelu:

- a - *BCTRAN* bez dodatkowych pojemności, b - *BCTRAN* z dołączonymi pojemnościami uzwojeń, c - *HYBRID* z uwzględnieniem typowych wartości pojemności uzwojeń dla modelowanego transformatora, d - *HYBRID*, z uwzględnieniem pojemności uzwojeń wyznaczonych na podstawie konstrukcji uzwojeń, e- model wysokoczęstotliwościowy

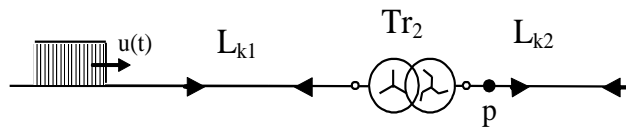
W badaniach wykonano symulacje załączania transformatora wyłącznikiem próżniowym do sieci 15 kV. Układ testowy zamodelowano podobnie jak układ do badań laboratoryjnych przedstawiony na rysunku 4.6. Wyniki symulacji wykonane z wykorzystaniem modelu wysokoczęstotliwościowego przedstawiono na rysunku 4.14. Obejmowały one przebiegi napięć występujące na zaciskach fazy uzwojenia górnego napięcia oraz przepięcia przenoszone do uzwojeń fazy dolnego napięcia.



Rys. 4.14. Przebiegi napięć przejściowych przenoszonych przez transformator 250 kVA, 15,75/0,4 kV, modelowane z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego: przebieg napięcia doziemnego w fazie AB górnego napięcia skala po lewej stronie, przebiegi przepięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniach dolnego napięcia, skala po prawej stronie

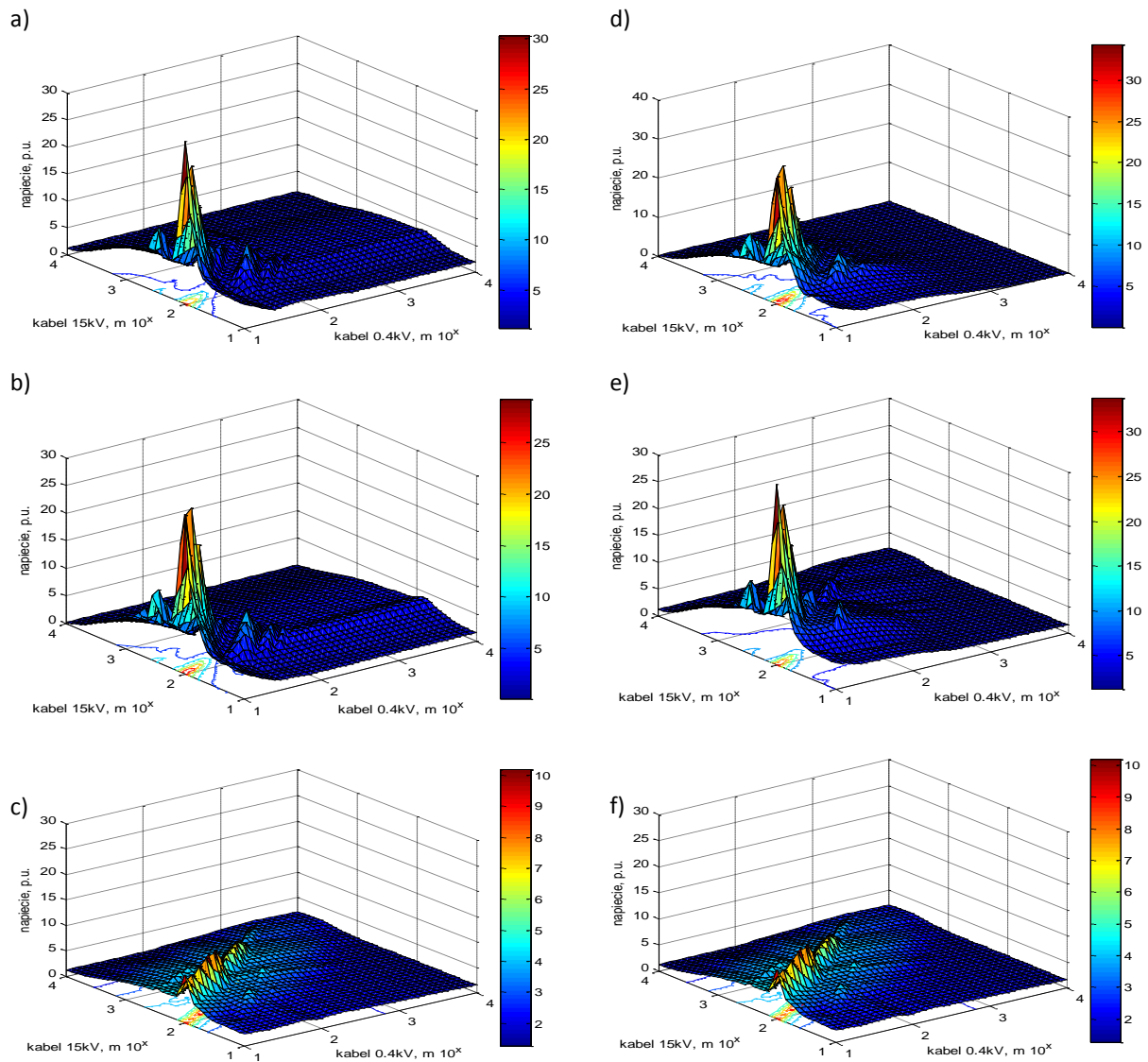
Przebiegi uzyskane z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego są zbliżone do przebiegów doświadczalnych przedstawionych na rysunku 4.7. Wartości maksymalne napięć doziemnych na zaciskach uzwojeń 15,75 kV sięgają 1,2-krotnej wartości maksymalnej napięcia zasilania.

Analizowano wpływ długości linii zasilających na wartości maksymalne przepięć przenoszonych. Wybrano dwa przypadki konfiguracji układu, w pierwszym linię zasilającą stronę 15 kV stanowiła linia kablowa, w drugim przypadku zasilanie średniego napięcia realizowane było za pomocą linii napowietrznej, w obu przypadkach do strony dolnego napięcia 0,4 kV dołączona była linia kablowa. W symulacjach zmieniano długości linii podłączonych do zacisków transformatora, w zakresie od 10 m do 10 km. Na rysunku 4.15 przedstawiono tylko wybrany schemat układu z transformatorem połączonym z liniami kablowymi.



Rys. 4.15. Schemat układu połączeń transformatora doświadczalnego z liniami kablowymi L_{k1} i L_{k2} , (p – punkt w którym wykonano symulacje przepięć przenoszonych doziemnych)

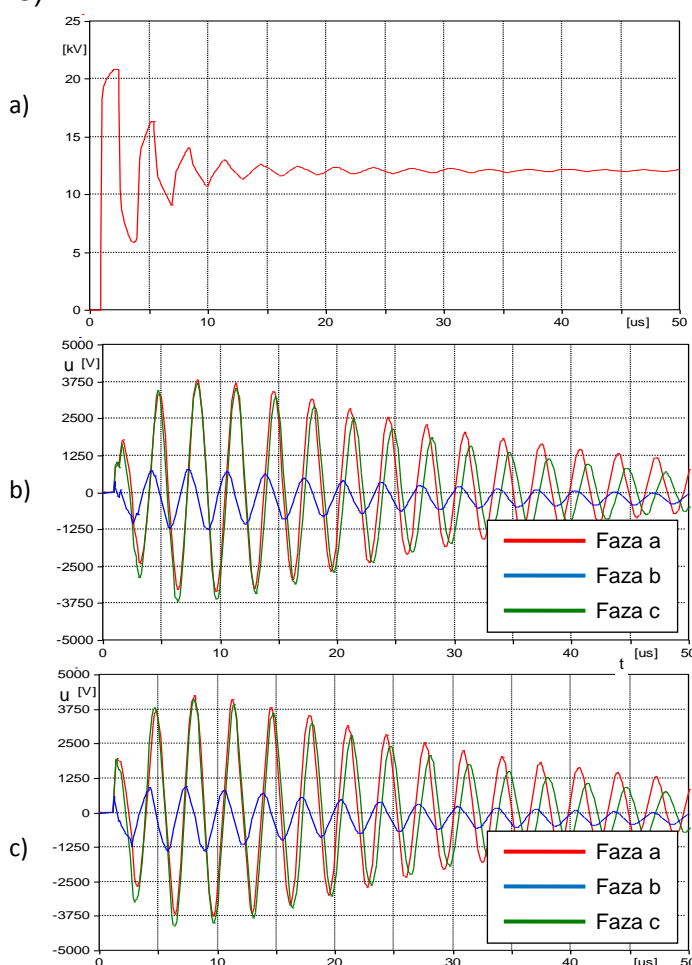
Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 4.16. Potwierdzają one występowanie długości krytycznych linii podłączonych do zacisków transformatora przy których wartości maksymalne przepięć przekraczają wartości wynikające z przekładni.



Rys. 4.16. Wpływ długości linii kablowej zasilającej 15 kV L_{k1} i linii kablowej 0,4 kV L_{k2} zasilanej na przepięcia przenoszone (rys. 5.34b): a,b,c - przepięcia doziemne na zaciskach uzwojeń 0,4 kV, d,e,f – przepięcia doziemne na końcu linii zasilanej 0,4 kV: a,b - faza a, b,e – faza b; c,f – faza c

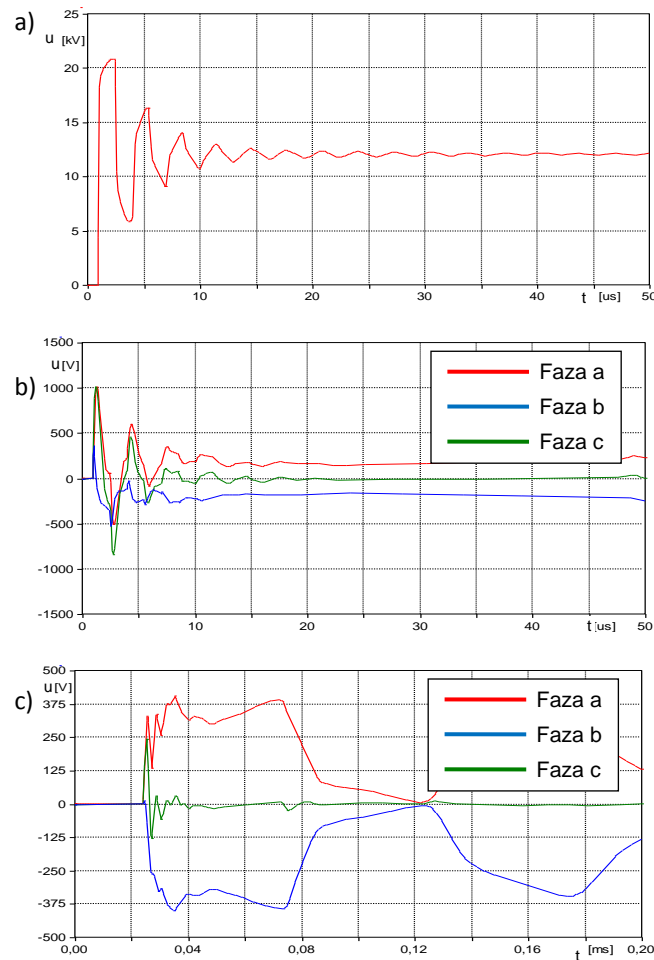
Wyniki symulacji prępień przenoszonych na zaciskach uzwojeń 0,4 kV zamieszczono na rysunku 4.16. Przetawiają one zależności wartości maksymalnych prępień w uzwojeniach 0,4 kV transformatora 250 kVA od długości linii połączonych z transformatorem. Dodatkowo badano wartości maksymalne prępień na końcu nieobciążonego kabla podłączonego do uzwojeń dolnego napięcia. Z analizy wyników widać, że dla wybranych długości kabla zasilającego stronę 15 kV, istnieją długości kabla 0,4 kV, przy których prępiecia przenoszone osiągną duże wartości szczytowe.

Wykonano symulacje prępień przenoszonych przez transformator 250 kV podczas załączania transformatora zasilanego linią kablową L_{k1} o napięciu znamionowym 15 kV i długości 100 m oraz linią kablową L_{k2} o napięciu znamionowym 0,4 kV o długości 10 m (rys. 4.17). Wartości prępień przenoszonych przez transformator powstających przy takich długościach linii, osiągną największe wartości (rys. 4.16).



Rys. 4.17. Przebiegi prępień doziemnych przenoszonych przez transformator 250 kV podczas załączania transformatora, bez ochrony prępieciowej, do sieci 15 kV, połączonego liniami kablowymi o długościach krytycznych: L_{k1} –100 m, L_{k2} –10 m: a - przebieg napięcia doziemnego w fazie A uzwojenia 15 kV, b - przebiegi prępień przenoszonych doziemnych uzwojenia 0,4 kV, c - przebiegi prępień na końcu kabla 0.4kV

W celu pokazania wpływu długości linii, połączonych z transformatorem, na prępiecia przenoszone, wykonano symulacje prępień w konfiguracji z liniami, o długościach różnych od długości krytycznych. Długości linii kablowej 15 kV L_{k1} wynosi 100 m, a długość linii kablowej 0,4 kV L_{k2} wynosi 1000 m. Wyniki prępień podczas operacji łączeniowej dla długości nie krytycznych zaprezentowano na rysunku 4.18.



Rys. 4.18 Przebiegi napięć doziemnych przenoszonych przez transformator 250 kV podczas załączania transformatora, bez ochrony przepięciowej, do sieci 15 kV, połączonego liniami kablowymi o długościach różnych od długości krytycznych $L_{k1} - 100$ m, $L_{k2} - 1000$ m:
 a - przebieg napięcia doziemnego w fazie AB uzwojenia 15 kV,
 b - przebiegi napięć przenoszonych doziemnych w uzwojeniach 0,4 kV – przebiegi na końcu kabla 0,4 kV podłączonego do zacisków transformatora

Przebiegi napięć przedstawionych na rysunkach 4.17 i 4.18 uwidaczniają wpływ długości linii zasilających na napięcia przenoszone indukowane w uzwojeniach dolnego napięcia transformatora. W przypadku występowania długości krytycznych dla danego transformatora (rys. 4.17) napięcia indukowane w uzwojeniach transformatora oraz na końcu linii 0.4 kV osiągają wartości 11.5 p.u. w odniesieniu do wartości znamionowej, dla długości nie krytycznych (rys. 4.19), przy których częstotliwości rezonansowe napięć różnią się od częstotliwości transformatora, napięcia indukowane w uzwojeniach dolnego napięcia i na końcu kabla 0,4 kV osiągają niższe wartości niż w przypadku długości krytycznych dla tych samych warunków napięciowych. Wartości napięć dla długości nie krytycznych osiągają wartości 3.39 p.u.. Zmiana długości linii zasilających powoduje obniżenie wartości maksymalnych napięć przenoszonych o 70%.

5. Podsumowanie

Efektom rozprawy doktorskiej jest:

- opracowanie wysokoczęstotliwościowego modelu transformatorów możliwego do implementacji w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (*EMTP-ATP*). Model zweryfikowano doświadczalnie i przeprowadzono analizę porównawczą z innymi modelami transformatorów stosowanymi w programie *EMTP-ATP*,
 - analiza przebiegów łączeniowych i piorunowych przenoszonych przez transformatory, narażających układy izolacyjne uzwojeń i urządzeń połączonych z transformatorami, na podstawie wyników symulacji przebiegów we fragmencie układu elektroenergetycznego zamodelowanym w programie *EMTP-ATP* z zaimplementowanym opracowanym modelem wysokoczęstotliwościowym transformatora.
 - Opracowano model wysokoczęstotliwościowy transformatorów dla celów symulacji przebiegów przenoszonych. Podstawą modelu są doświadczalne charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia transformatorów. Do rejestracji charakterystyk częstotliwościowych zastosowano stanowisko pomiarowe, umożliwiające wykonanie pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości.
 - Wykonano badania przebiegów o zróżnicowanych przebiegach przenoszonych przez transformatory. Badania obejmowały przebiegi powstające podczas działania udarów napięciowych prostokątnych, modelujących napięcia przejściowe, pojawiające się na zaciskach uzwojeń podczas działania ograniczników przebiegów chroniących transformatory. Rejestrowano także charakterystyki częstotliwościowe przebiegów przenoszonych umożliwiające analizę reakcji transformatorów na przebiegi zawierające składowe przejściowe o częstotliwościach zawartych w szerokich granicach.
 - Porównano opracowany model wysokoczęstotliwościowy transformatorów z modelami stosowanymi w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (*EMTP-ATP*).
 - Przeprowadzono ocenę wpływu urządzeń elektroenergetycznych, pracujących na różnych poziomach napięć połączonych z transformatorami, na przebiegi przenoszone przez uzwojenia transformatora,
 - Wykonano symulacje przebiegów łączeniowych i piorunowych przenoszonych przez transformator pracujący w typowym fragmencie układu elektroenergetycznego w różnych warunkach pracy transformatora.
- Wyniki symulacji potwierdzają, iż przebiegi przenoszone przez transformatory zależą od przebiegów i wartości przebiegów powstających w układach elektroenergetycznych oraz zjawisk przejściowych w sieciach determinowanych przez układ połączeń i parametry urządzeń elektrycznych. Przeprowadzona analiza przebiegów przenoszonych przez transformatory wykazała, że ochrona od przebiegów przenoszonych łączeniowych i piorunowych transformatorów wymaga stosowania

ograniczników przepięć chroniących uzwojenia górnego i dolnego napięcia, również wówczas, gdy transformatory są połączone z liniami kablowymi.

- Szerokie badania i symulacje przepięć przenoszonych przez transformatory przedstawione w rozprawie wykonane w programie *EMTP-ATP* przy zastosowaniu różnych modeli transformatorów wykazały, że zastosowanie modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów zwiększa dokładność symulacji i rozszerza zakres stosowania programu *EMTP-ATP* do modelowania układów elektroenergetycznych w warunkach stanów przejściowych dla celów analizy narażeń urządzeń elektrycznych pracujących na różnych poziomach napięć. Stosowanie modelu matematycznego wysokoczęstotliwościowego transformatorów oraz przedstawiona analiza przepięć łączeniowych i piorunowych przenoszonych przez transformatory mogą być pomocne w uściśleniu metod koordynacji izolacji i doskonalenia ochrony przejściowej układów elektroenergetycznych.

6. Literatura

- [1] Florkowski M., Furgał J.: Application of transfer function to recognition of resonance overvoltages in transformer windings, *Measur. Scien. and Techn.*, Vol. 21, No. 12, 2010, pp. 1 – 9
- [2] Florkowski M., Furgał J.: Rozpoznawanie uszkodzeń uzwojeń na podstawie funkcji przenoszenia transformatorów, *Przegl. Elektrot. (Electrical Review)*, R. 83, Nr 12/2007, str. 60 – 63
- [3] Florkowski M., Furgał J.: Terminal based recognition of resonance overvoltages in transformer windings, *Proc. of the 16th Int. Symp. on High Volt. Engin.*, Cape Town, South Africa, 24 - 28 Aug. 2009, pp. 10 - 15
- [4] Furgał J., Kuniewski M.: Wyznaczanie napięć przenoszonych przez transformatory przy zastosowaniu charakterystyk częstotliwościowych, *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrot. i Autom. Polit. Gdańskiej*, Nr 31, 2012, str. 49 – 52
- [5] Gustavsen B., Semelyen A.: Simulation of transmission line transients using vector fitting and modal decomposition, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 13, No. 2, April 1998, pp. 605 – 614
- [6] Gustavsen B.: Wide band modeling of power transformers, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 19, No. 1, Jan. 2004, pp. 414 - 422
- [7] Gustavsen B.: Application of vector fitting to high frequency transformer modeling, *The Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST' 03)*, New Orlenas (USA), pp. 1-5
- [8] Gustavsen, B.: Computer code for rational Approximation of frequency dependant admittance matrices, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 17, No. 4, Oct. 2002, pp. 1093 -1098
- [9] PN-EN 60071-2 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania
- [10] Rahimpour E., Christian J., Feser K., Mohseni H.: Calculation of the transfer function to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings, *12th Int. Symp. on High Volt. Engin. ISH'2001*, Bangalore (India), 20 - 24 Aug. 2001
- [11] Rosołowski E.: Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych, Wrocław, 2004