



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

*Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych*

Autor: mgr inż. Bartłomiej Adamczyk

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Marek Florkowski

Praca wykonana: Centrum Technologiczne ABB w Krakowie  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Elektroniki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023



AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

**FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

SCIENTIFIC DISCIPLINE: AUTOMATION, ELECTRONICS,  
ELECTRICAL ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

## **DOCTORAL THESIS**

*Analysis of fast transient phenomena in selected  
winding patterns of power transformers*

Author: M.Sc.Eng. Bartłomiej Adamczyk

First supervisor: Prof. D.Sc. Eng. Marek Florkowski

Completed in: ABB Corporate Technology Center in Krakow;  
AGH University of Science and Technology;  
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Biomedical  
Engineering; Department of Electrical and Power Engineering

Krakow, 2023

*Mojej Kochanej Żonie Ewelinie*

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania mojemu promotorowi  
prof. dr hab. inż. Markowi Florkowskiemu -  
za opiekę merytoryczną, cenne uwagi oraz cierpliwość  
i ciągle motywowanie mnie do ukończenia pracy.*

*Dziękuję również:*

- Pani prof. dr hab. inż. Barbarze Florkowskiej -  
za motywację do podjęcia realizacji pracy doktorskiej,*
- Panu dr inż. Piotrowi Pająkowi - za udostępnienie  
źródłowych wyników badań do analizy,*
- Panu dr inż. Wojciechowi Piaseckiemu – za cenne uwagi i wskazówki,*
- Kolegom z firmy ABB, szczególnie z Centrum Technologicznego ABB  
w Krakowie - za wsparcie,*
- Kolegom z firmy Hitachi Energy (wcześniej ABB) z oddziału krakowskiego oraz  
Fabryki Transformatorów w Łodzi,*
- Panom: dr inż. Adamowi Ketnerowi i Ś.P. mgr inż. Andrzejowi Maliszewskiemu -  
za wielokrotne dyskusje i dzielenie się wiedzą oraz cennym doświadczeniem.*

*Pragnę również podziękować mojej Rodzinie, w szczególności Żonie Ewelinie  
i córkom, Aleksandrze, Magdalenie i Marii - za cierpliwość, wyrozumiałość oraz  
wsparcie i motywowanie do działania,  
oraz Rodzicom za wsparcie w czasie realizacji pracy.*

*Dziękuję również wszystkim, których nie wymieniłem tu z imienia i nazwiska,  
a którzy byli mi życzliwi i pomocni.*

# STRESZCZENIE

## **Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych**

Transformatory energetyczne są narażone na oddziaływanie szybkozmiennych przepięć w warunkach eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Ich przebiegi stanowią źródło przepięć wewnętrznych w uzwojeniach oraz narażają układy izolacyjne transformatorów. Ze względu na budowę i wynikający z niej schemat zastępczy *RLC* uzwojenia, przepięcia wewnętrzne mogą mieć odmienny charakter niż napięcie wymuszające, a w pewnych przypadkach mogą być wzmacniane w wyniku zjawiska rezonansu. Odpowiedź uzwojenia na pojawiające się przepięcie jest uzależniona od sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych jego części składowych, zatem uzwojenia o różnej konstrukcji zachowują się odmiennie w czasie oddziaływania przepięć. Narażenia przepięciowe izolacji uzwojeń są w uzależnione od nieliniowości początkowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia, który wynika ze stosunku pojemności doziemnych i szeregowych uzwojenia. W praktyce poprawę tego rozkładu uzyskuje się stosując przeplatanie zwojów w cewkach, stosowanie ekranów elektrostatycznych lub wplatanie specjalnych zwojów ekranujących pomiędzy zwoje robocze uzwojenia. Metody te mają różną skuteczność w poprawie odporności uzwojenia na pojawiające się przepięcia, zatem wybór odpowiedniego sposobu poprawy początkowego rozkładu napięcia powinien być poprzedzony wnikliwą analizą w przypadku każdego transformatora.

Problematyka niniejszej pracy doktorskiej dotyczy analizy zjawisk przepięciowych w różnych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych. Zakres pracy obejmował badania eksperymentalne rozkładów przepięć prowadzone na rzeczywistych uzwojeniach transformatorów oraz symulacje numeryczne rozkładu pola elektrostatycznego w modelach uzwojeń o konstrukcji warstwowej oraz cewkowej. Analizy wyników badań eksperymentalnych obejmowały pomiary rozkładów przepięć w uzwojeniach przy wymuszeniach szybkozmiennych oraz wyznaczenie pseudo-początkowych rozkładów napięcia w uzwojeniach i rozkładów przepięć maksymalnych. W przypadku uzwojenia warstwowego badano m.in. wpływ obecności lub braku ekranów oraz ich polaryzacji względem uzwojenia na rozkłady przepięć maksymalnych. Analiza symulacyjna dotyczyła wpływu konstrukcji uzwojeń na kształty początkowych rozkładów potencjału elektrostatycznego oraz wynikających z nich narażeń izolacji. Analizowano zmianę tych narażeń wynikającą ze zmian konstrukcyjnych w uzwojeniu, polegających na zastosowaniu ekranów, pierścieni ekwipotencjalnych oraz różnych metod przeplatania zwojów w cewkach.

Przeprowadzone badania eksperymentalne, symulacje numeryczne i analizy pozwoliły na wyciągnięcie praktycznych wniosków oraz sformułowanie zaleceń konstrukcyjnych, które mogą być użyteczne w procesie projektowania i obliczania transformatorów energetycznych oraz w celu doskonalenia konstrukcji transformatora pod kątem poprawy odporności przepięciowej.

# **ABSTRACT**

## **Analysis of fast transient phenomena in selected winding patterns of power transformers**

Power transformers are subjected to surge overvoltages in exploitation and during routine tests. When the surge waveform reaches the transformer terminals, it can generate overvoltages of high magnitude inside the windings, which in effect can lead to failure of the winding insulation. The amplitude of the internal overvoltages is dependent on the parameters of the surge voltage (duration, wave shape, steepness etc.) approaching to the transformer terminals and the design of the windings. The transient response of the winding to fast transient voltage is mainly affected by capacitive and inductive couplings of the windings, which are dependent on the physical arrangement of turns, discs or layers in the windings and grounded elements inside the transformer tank, therefore various winding designs perform differently when surge voltage is applied to their terminals. The transformer winding insulation stresses are dependent also on the nonlinearity of so called initial voltage distribution, determined by the ratio of the ground and series capacitances of the winding. This initial distribution can be improved by increasing the series, or decreasing the ground capacitance of the winding, which can be obtained in various ways: e.g. by interleaving turns within winding discs, application of shielding wires between regular turns, using electrostatic shields or increasing distance to grounded parts of the transformer. Depending on the method selected for improving the initial voltage distribution, its influence on the overvoltage stresses of the transformer insulation is different, therefore the selection of the method should be done carefully and individually for each transformer.

The aim of the dissertation was to analyze fast transient phenomena in selected patterns of power transformer windings. The scope of the thesis included experimental and simulation study of transient stresses in the windings of disc and layer design. The experimental part was based on the analysis of measurements results of overvoltages distribution in real full-scale transformer windings. The pseudo-initial and maximal voltage distributions have been evaluated based on experimental data. The experimental part related to layer winding included analysis of the influence of presence and polarity of electrostatic shields against winding on the corresponding insulation threat. The simulation part of the thesis was based on calculation of electrostatic field distribution in the layer and the disc winding models. The research was focused on analysis of the impact of placement and polarity of the electrostatic shields in the layer winding, and various methods of interleaving turns and presence of the electrostatic shielding ring in the disc winding, on the initial distribution of electrostatic potential along the winding.

The performed experimental and simulation studies and analyses allowed to formulate conclusions of practical importance and design recommendations that could be useful for improving the power transformer winding designs in terms of fast transients vulnerability.

## Spis treści

<b>Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Wstęp.....</b>	<b>12</b>
<b>2 Wprowadzenie, cel i zakres pracy .....</b>	<b>14</b>
<b>3 Historia, stan techniki i perspektywy rozwoju transformatorów energetycznych ....</b>	<b>18</b>
<b>4 Uzwojenia wysokonapięciowych transformatorów energetycznych .....</b>	<b>30</b>
4.1 Uzwojenia cewkowe wysokiego napięcia .....	32
4.1.1 Cewki podwójne i wywrotkowe .....	32
4.1.2 Uzwojenia przeplatane .....	35
4.1.3 Uzwojenia z wplatanymi zwojami ekranującymi .....	40
4.2 Uzwojenia warstwowe wysokiego napięcia.....	43
<b>5 Narazenia przepięciowe izolacji uzwojeń transformatorów energetycznych .....</b>	<b>48</b>
5.1 Klasyfikacja przepięć w sieciach elektroenergetycznych .....	48
5.2 Charakterystyka wybranych przebiegów przepięć.....	50
5.3 Układ izolacyjny transformatora .....	54
5.4 Zjawiska przepięciowe w uzwojeniach transformatorów .....	59
5.4.1 Początkowy i pseudo-początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu .....	65
5.4.2 Metody ograniczania narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń.....	68
<b>6 Metody modelowania i obliczania stanów przejściowych w transformatorach.....</b>	<b>73</b>
6.1 Analiza stanu techniki .....	73
6.2 Zastosowanie metody polowej do wspomaganie analizy stanów przejściowych w transformatorach energetycznych.....	78
<b>7 Analiza przepięć w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego .....</b>	<b>82</b>
7.1 Obiekt badań.....	83
7.2 Badania i analiza przepięć w ekranowanym uzwojeniu wielowarstwowym transformatora energetycznego .....	86
7.2.1 Wpływ ekranów na przepięcia doziemne i międzywarstwowe w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora.....	90

7.2.2	Wpływ konfiguracji ekranów względem uzwojenia na rozkład wartości maksymalnych przepięć doziemnych w uzwojeniu wielowarstwowym .....	92
7.2.3	Porównanie wpływu ekranów na przepięcia w uzwojeniu .....	98
7.2.4	Ocena skuteczności ekranowania .....	100
7.3	Wyznaczanie rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego .....	104
7.3.1	Model uzwojenia warstwowego i metodologia obliczeń.....	104
7.3.2	Konfiguracja 0 – Uzwojenie nieekranowane .....	108
7.3.3	Konfiguracja 1 – uzwojenie w pełni ekranowane.....	112
7.3.4	Konfiguracja 2 – ekran wewnętrzny - podłączony, ekran zewnętrzny - odłączony .....	117
7.3.5	Konfiguracja 3 – ekran wewnętrzny - odłączony, ekran zewnętrzny - podłączony .....	120
7.3.6	Konfiguracja 4 – oba ekrany na pływających potencjałach.....	123
7.3.7	Konfiguracja 5 – ekran wewnętrzny podłączony, ekran zewnętrzny - brak...	127
7.3.8	Konfiguracja 6 – ekran wewnętrzny - odłączony, ekran zewnętrzny - brak ..	130
7.4	Dyskusja wyników .....	134
<b>8</b>	<b>Analiza przepięć w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego .....</b>	<b>140</b>
8.1	Obiekt badań.....	141
8.2	Analiza przepięć w eksperymentalnym uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego .....	142
8.2.1	Wyniki badań przepięć w uzwojeniu cewkowym przy wymuszeniu udarem prostokątnym.....	143
8.2.2	Wyniki badań przepięć w uzwojeniu cewkowym przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym .....	146
8.3	Wyznaczanie rozkładów początkowych potencjału w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego .....	151
8.3.1	Model uzwojenia cewkowego i metodologia obliczeń.....	151
8.3.2	Uzwojenie wywrotkowe .....	153
8.3.3	Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem Chadwicka-Stearna .....	157



8.3.4 Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem Kratochwila.....	160
8.3.5 Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem van Nuysa.....	163
8.3.6 Uzwojenie cewkowe splatane częściowo .....	166
8.3.7 Uzwojenie cewkowe przeplatane – czterocewki .....	168
8.3.8 Badanie wpływu pierścieni ekwipotencjalnych.....	172
8.3.9 Uzwojenie z końcem izolowanym .....	177
8.4 Dyskusja wyników .....	179
<b>9 Podsumowanie.....</b>	<b>194</b>
<b>10 Literatura .....</b>	<b>199</b>

## Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

$e$	indukowana siła elektromotoryczna
$\Phi$	strumień magnetyczny
$t$	czas
$D$	wektor indukcji elektrycznej
$\rho$	objętościowa gęstość ładunku elektrycznego
$B$	wektor indukcji magnetycznej,
$J$	wektor gęstości prądu elektrycznego,
$E$	wektor natężenia pola elektrycznego,
$H$	wektor natężenia pola magnetycznego.
$C$	pojemność
$C_c, C_s, C_e$	pojemność szeregową (międzycewkową, międzywarstwową, międzyzwojową)
$C_g, C_z$	pojemność doziemna
$L$	indukcyjność
$R$	rezystancja
$G$	konduktancja
$Z$	impedancja
$DN$	uzwojenie dolnego napięcia
$GN$	uzwojenie górnego napięcia
$n$	liczba zwojów, liczba punktów pomiarowych
$V, V_0$	potencjał elektrostatyczny
$V_{c1}, V_{c2}, V_{c5}$	potencjały elektrostatyczne cewek uzwojenia
$u, U$	napięcie
$l$	długość uzwojenia
$x/l$	względna długość/wysokość uzwojenia
$x$	współrzędna punktu pomiarowego w uzwojeniu
$\alpha$	współczynnik nieliniowości początkowego/pseudo-początkowego rozkładu napięcia w uzwojeniu
$E$	natężenie pola elektrycznego $E = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}$
$E_r, E_z$	składowa promieniowa i osiowa wektora natężenia pola elektrycznego $E$
$E_{max\ z-z}$	maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego w przestrzeni
$E_{max\ c1-c2}$	międzyzwojowej i międzycewkowej
$S_{eff}$	współczynnik skuteczności ekranowania
$S_{eff2}$	współczynnik skuteczności ekranowania – uproszczona forma

$\mathbf{P}$	wektor polaryzacji elektrycznej
$\varepsilon$	przenikalność dielektryczna ( $\varepsilon_0$ – próżni, $\varepsilon_r$ -materialu izolacyjnego)
$\mu$	przenikalność magnetyczna
$\tau$	stała czasowa
$f$	częstotliwość
$\Delta u_x$	procentowa różnica napięć pomiędzy rozkładem przepieć maksymalnych i rozkładem końcowym w punkcie o współrzędnej $x$
$u_{max,x}$	maksymalna wartość napięcia w punkcie o współrzędnej $x$
$U_{fin,x}$	maksymalna wartość napięcia końcowego w punkcie o współrzędnej $x$
$u_{max}(x)$	funkcja opisująca względny rozkład maksymalnych przepieć w uzwojeniu
$U_{fin}(x)$	funkcja opisująca względny rozkład końcowy napięcia w uzwojeniu
$HV$	wysoki potencjał, wysokie napięcie
$GND$	warunek brzegowy określający potencjał ziemi $V=0$ V
$FP$	warunek brzegowy „ <i>Floating potential</i> ”
$CT\dot{Z}$	przewód nawojowy o ciągłej transpozycji żył
$U_p$	rozkład początkowy napięcia w uzwojeniu
$U_k$	rozkład końcowy napięcia w uzwojeniu
$U_m$	obwiednia maksymalnych przepieć w uzwojeniu
$U_{osc}$	przebiegi wyrównawcze w uzwojeniu pomiędzy rozkładem $U_p$ i $U_k$
$AC$	prąd przemienny
$DC$	prąd stały
$wnz$	wyładowania niezupełne
$FRA$	<i>Frequency Response Analysis</i> – analiza odpowiedzi obiektu dziedzinie częstotliwości
$HVDC$	układy prądu stałego o wysokim napięciu
$DGA$	<i>Dissolved Gas Analysis</i> – analiza gazów rozpuszczonych w oleju
$nN, SN,$ $WN$	niskie, średnie i wysokie napięcie
$PWM$	<i>Pulse Width Modulation</i> – modulacja szerokości impulsów
$VFTO$	<i>Very Fast Transient Overvoltages</i> – przebiegi szybkozmienne o bardzo stromym czole
$STL, MTL$	<i>Single and Multiconductor Transssmission Line</i> – jedno i wielotorowa linia przesyłowa
$FEM, MES$	<i>Finite Element Method</i> – metoda elementów skończonych

# 1 Wstęp

Transformatory to kluczowe elementy układów elektroenergetycznych. Ich niezawodność w dużej mierze decyduje o niezawodności całego systemu elektroenergetycznego. Z tego względu prowadzone są ciągłe prace mające na celu lepsze zrozumienie zjawisk fizycznych zachodzących w uzwojeniach, układach izolacyjnych, czy też obwodach magnetycznych transformatora. Celem tych prac jest doskonalenie i optymalizacja techniczno-ekonomiczna konstrukcji transformatorów. Dodatkowo, stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wymusza na producentach transformatorów opracowywanie rozwiązań o coraz wyższych parametrach znamionowych z zachowaniem możliwie kompaktowych rozmiarów. Wszystkie te aspekty stawiają przed konstruktorami transformatorów nowe wyzwania w obszarze badań i rozwoju, projektowania, technologii produkcji, testowania oraz badań diagnostycznych i kontrolnych. Konieczne staje się opracowywanie nowych oraz doskonalenie już istniejących metod i analiz badawczych oraz rozwijanie rozwiązań monitorujących w sposób ciągły stan techniczny transformatora i alarmujących w przypadku przekroczenia jego krytycznych parametrów. W ostatniej dekadzie coraz większe zainteresowanie wzbudzają układy i urządzenia analizujące stopień zużycia elementów transformatora oraz „przewidujące” pozostały czas życia i informujące o koniecznym serwisie. Są to systemy monitorujące, prewencyjne i predykcyjne. Takie rozwiązania pozwalają na lepsze planowanie remontów i renowacji transformatorów oraz pomagają uniknąć awarii w czasie eksploatacji.

Jeden z bardzo ważnych obszarów, dotyczy badań i analizy odporności transformatorów na narażenia powstające w czasie eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Wśród tych narażeń należy wymienić narażenia elektryczne, cieplne oraz mechaniczne. Aby transformator pracował bezawaryjnie, musi spełniać odpowiednie wymagania i normy dotyczące wszystkich tych aspektów jednocześnie. Istotny wpływ na niezawodność transformatora mają narażenia przepięciowe powstające w czasie prób odbiorczych oraz w czasie normalnej pracy urządzenia. Tematyka narażeń przepięciowych transformatorów jest bardzo obszerna i obejmuje zarówno problematykę wewnętrznego układu izolacyjnego transformatora, jak i jego izolacji zewnętrznej.

Tematyka analizy narażeń przepięciowych wewnętrznych obejmuje przede wszystkim problematykę zjawisk zachodzących w uzwojeniach oraz izolacji transformatora i jest kluczowa od samego początku procesu projektowania transformatora, aż do końca jego eksploatacji. Ograniczenie skutków zjawisk przepięciowych przez ciągłe doskonalenie konstrukcji transformatora, na podstawie badań i analiz, w znaczący sposób przekłada się na poprawę niezawodności transformatora, a co za tym idzie, całego systemu elektroenergetycznego.

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto tematykę analizy zjawisk przepięciowych w różnych topologiach uzwojeń transformatorów elektroenergetycznych. Analizy teoretyczne i eksperymentalne dotyczące narażeń przepięciowych transformatorów są prowadzone w wielu ośrodkach na świecie, głównie przez producentów transformatorów oraz w jednostkach

akademickich. Prace naukowe w tej dziedzinie prowadzone były między innymi w Korporacyjnym Centrum Badawczym ABB w Krakowie (obecnie Korporacyjne Centrum Technologiczne ABB), w Fabryce Transformatorów ABB w Łodzi (obecnie Hitachi Energy) oraz w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Prowadzone analizy dotyczyły m.in. zjawisk przepięciowych oraz modelowania stanów przejściowych w transformatorach energetycznych.

Problematyka rozprawy doktorskiej pt. „Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych” stanowi kontynuację badań w omawianej dziedzinie nauki. W rozprawie doktorskiej zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych narażeń powstających w transformatorach w czasie oddziaływania szybkodziennych przepięć. Analizowano wpływ konstrukcji uzwojeń na powstające narażenia przepięciowe układów izolacyjnych oraz wpływ wprowadzania zmian konstrukcyjnych na ograniczenie tych narażeń. Zmiany konstrukcyjne obejmowały zastosowanie ekranów elektrostatycznych, pierścieni ekwipotencjalnych oraz stosowanie przeplatania zwojów w cewkach, w celu poprawy początkowego rozkładu napięcia, powstającego w uzwojeniu w pierwszej fazie oddziaływania napięć szybkodziennych. Przeprowadzone badania, symulacje i analizy pozwoliły na wyciągnięcie praktycznych wniosków oraz sformułowanie zaleceń konstrukcyjnych, które mogą być użyteczne w procesie projektowania i obliczania transformatorów energetycznych.

## 2 Wprowadzenie, cel i zakres pracy

Niezawodność pracy całego systemu elektroenergetycznego jest w znacznym stopniu uzależniona od niezawodności transformatorów, które są jego kluczowymi elementami. Oddziaływanie przepięć różnego pochodzenia stanowi jeden z najistotniejszych problemów i zagrożeń izolacji transformatorów i może prowadzić do awarii, pomimo zastosowanej ochrony przeciwprzebieciowej. Zagrożenia te wynikają z wartości maksymalnych, kształtu oraz czasu oddziaływania przepięć na izolację transformatora. Pośród różnych rodzajów przepięć, na szczególną uwagę zasługują przebiecia piorunowe (pochodzenia atmosferycznego oraz probiercze) ze względu na ich duże wartości maksymalne oraz stromości narastania.

Ze względu na specyfikę konstrukcji transformatorów, narażenia przebieciowe izolacji wewnętrznej oraz zewnętrznej stanowią odrębne zagadnienia. Zagrożenie izolacji zewnętrznej wynika z kształtu, czasu oddziaływania i wartości maksymalnej przebiecia, jakie dociera do zacisków transformatora, natomiast przebiecia wewnątrz uzwojeń są uzależnione dodatkowo od reakcji uzwojenia na pojawiającą się falę udarową. Przebiecia wewnętrzne mogą znacząco różnić się od tych pojawiających się na zaciskach transformatora, ze względu na oddziaływanie pojemnościowych i indukcyjnych sprzężeń wewnątrz uzwojeń, powodujących powstanie obwodów rezonansowych. Sprzężenia te bezpośrednio wynikają ze sposobu wzajemnego ułożenia poszczególnych zwojów, cewek lub warstw uzwojenia oraz położenia uzwojeń górnego napięcia (GN) i dolnego napięcia (DN) względem siebie oraz względem uziemionych części konstrukcyjnych transformatora, jak np. kadź czy rdzeń magnetyczny. Każda zmiana w geometrii transformatora, jego wymiarach, sposobie ułożenia zwojów, czy też zastosowanych materiałach, ma odzwierciedlenie w wartościach pojemności szeregowych oraz doziemnych uzwojenia. To z kolei ma wpływ na rozkład początkowy napięcia w uzwojeniu. Z tego względu, różne topologie uzwojeń zachowują się odmiennie przy doprowadzeniu stromej fali udarowej do ich zacisków [7,34,78,82,89,139,145,164,204,215,219]. Problematyka narażeń przebieciowych wewnątrz transformatora została podjęta w niniejszej pracy doktorskiej.

W praktyce, powszechnie stosowane są różne metody ograniczania narażeń izolacji uzwojeń transformatorów od przepięć. Należą do nich: przeplatanie zwojów w cewkach, stosowanie specjalnych zwojów ekranujących oraz ekranów elektrostatycznych. Dwie pierwsze metody są stosowane w uzwojeniach o konstrukcji cewkowej, natomiast trzecia odnosi się raczej do uzwojeń typu warstwowego. Niemniej jednak, znane są też konstrukcje transformatorów z uzwojeniami cewkowymi i dołączonym do nich ekranem elektrostatycznym. Wspomniane metody bazują na koncepcji konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregowej lub zmniejszenia pojemności doziemnej uzwojenia, w celu poprawy początkowego rozkładu napięcia w uzwojeniu i ograniczenia wartości maksymalnych przepięć wewnętrznych [7,20,23,45,78,95,105,117,126,137,163,182,208,228]. W celu ochrony uzwojeń od przepięć stosowane są również beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali [82], ale ich problematyka nie jest przedmiotem tej pracy.

Znajomość charakteru i rozkładu przepięć w uzwojeniach jest konieczna do prawidłowego zaprojektowania ich izolacji. Dlatego też w wielu ośrodkach badawczych i przemysłowych na świecie, prowadzone są prace mające na celu określenie narażeń jakim poddawana jest izolacja transformatora podczas oddziaływania przepięć różnego pochodzenia. Prace te obejmują zarówno badania eksperymentalne prowadzone na rzeczywistych obiektach, bądź specjalnie przygotowanych modelach, jak i obliczenia oraz symulacje komputerowe. Dotyczą one między innymi analizy rozkładów przepięć piorunowych w różnych konstrukcjach uzwojeń transformatorów oraz wpływu zmian konstrukcyjnych na zmniejszenie zagrożeń przepięciowych izolacji transformatorów. Pomimo że prace nad analizą zjawisk przepięciowych w uzwojeniach transformatorów energetycznych są prowadzone na całym świecie od wielu lat, problematyka ta jest nadal aktualna. Wynika to z ciągłego dążenia do obniżenia kosztów wytwarzania transformatorów, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego zapasu wytrzymałości elektrycznej oraz ich niezawodności. Początkowo producenci transformatorów bazowali głównie na wynikach badań eksperymentalnych, ale obecnie, dzięki rozwojowi w dziedzinie technologii informatycznej, w dużym stopniu opierają swoje konstrukcje na wynikach analiz komputerowych [13,78,253].

W rozprawie doktorskiej podjęto problematykę narażeń przepięciowych układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów o różnych topologiach, pochodzących od szybkozmiennych zjawisk przejściowych. Analizę przeprowadzono na podstawie badań eksperymentalnych rozkładów przepięć w rzeczywistych modelach uzwojeń transformatorów o konstrukcji wielowarstwowej i cewkowej oraz symulacji rozkładów potencjału oraz natężenia pola elektrostatycznego w komputerowych modelach rzeczywistych obiektów. Symulacyjną ocenę narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń transformatorów oparto na analizie rozkładu pola elektrostatycznego, ponieważ w początkowej fazie oddziaływania przebiegu udarowego na transformator, sprzężenia indukcyjne są mało istotne i można je pominąć, a rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia są uzależnione od sprzężeń pojemnościowych i są nazywane rozkładami początkowymi (lub pojemnościowymi). Z tego względu można posługiwać się analogią do rozkładów pola elektrostatycznego [95,105]. Rozkład początkowy można traktować jako umowną granicę, do jakiej dążyłoby chwilowe rozkłady napięcia w uzwojeniu przy ciągłym zwiększaniu stromości narastania udaru napięciowego. Rozkład początkowy, choć to pojęcie tylko teoretyczne (w naturze udary o nieskończonej stromości nie występują), jest źródłem wielu użytecznych informacji o naturalnej odporności uzwojenia na pojawiające się przepięcie o dużej stromości i może być podstawą do wstępnej oceny narażeń przepięciowych izolacji uzwojenia. Analizy zjawisk przejściowych uwzględniające efekty pojemnościowe, indukcyjne oraz zjawiska rezonansowe w uzwojeniach, były przedmiotem wielu prac doktorskich, książek oraz artykułów naukowych, np. [73,78,82,89,120,164,169,180,215,227]. W pracy doktorskiej analizowano uzwojenia znajdujące się w powietrzu odwzorowując rzeczywiste warunki przeprowadzania badań na obiektach. Wpływ oleju nie został uwzględniony, jednakże zgodnie z praktycznymi badaniami prowadzonymi m.in. przez A. Maliszewskiego (np. [95,130,134]), różnice w maksymalnych wartościach przepięć mierzonych na uzwojeniach znajdujących się w oleju i w powietrzu są nieduże (nie więcej jak kilka procent).

Celem prac przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej było zbadanie wpływu różnych zmian konstrukcyjnych (celowych lub mogących wystąpić w przypadku awarii bądź błędnego montażu na etapie produkcji) na narażenia przepięciowe w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów. Analizy oparto na badaniach eksperymentalnych oraz symulacyjnych analizach teoretycznych. Opracowano metodykę porównania różnych konfiguracji uzwojeń względem siebie, w celu oceny występujących w nich narażeń przepięciowych oraz modele symulacyjne do analizy narażeń w różnych topologiach uzwojeń. Autor pracy posiadał unikalną możliwość prowadzenia badań na rzeczywistych, pełnowymiarowych obiektach, w szczególności na uzwojeniu wielowarstwowym wysokiego napięcia, które nie jest powszechną konstrukcją stosowaną w transformatorach energetycznych wysokiego napięcia. Dodatkową wartością była możliwość wprowadzania zmian konstrukcyjnych w postaci podłączania, odłączania lub demontażu ekranów, co miało wpływ na zmianę narażeń przepięciowych. Ze względu na unikalność konstrukcji uzwojenia wielowarstwowego, część wyników przeprowadzonych prac stanowi informacje wrażliwe dla firmy ABB oraz Hitachi Energy i z tego względu nie wszystkie informacje i wyniki badań mogły zostać opublikowane. Z tego powodu, część analiz ogranicza się do oceny jakościowej oraz uwzględnia tylko te dane, które mogły zostać upublicznione.

Teza niniejszej rozprawy doktorskiej jest następująca:

**- badania eksperymentalne rozkładów przepięć w uzwojeniach o różnych topologiach, wzbogacone o wyznaczenie rozkładu pseudo-początkowego napięcia oraz symulacje rozkładów pola elektrycznego w uzwojeniach, umożliwiają rozszerzenie analiz mających na celu ocenę skutków narażeń izolacji uzwojeń transformatorów od przepięć i pozwalają na doskonalenie ich konstrukcji w celu poprawy odporności na działanie przepięć.**

W celu potwierdzenia tezy rozprawy doktorskiej wykonano eksperymentalne badania przepięć w rzeczywistych uzwojeniach transformatorów o różnej budowie, wyznaczono rozkłady pseudo-początkowe, chwilowe i rozkłady maksymalnych wartości napięcia udarowego wzdłuż uzwojeń oraz przeprowadzono symulacje rozkładów pola elektrostatycznego w modelach uzwojeń. Analizie poddano uzwojenia transformatorów energetycznych o konstrukcji wielowarstwowej i cewkowej (dyskowej). Symulacje przeprowadzono w środowisku *COMSOL Multiphysics*. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami symulacji. Analizowano wpływ różnych czynników na zmianę narażeń przepięciowych uzwojeń wielowarstwowo- i cewkowych. Szczególną uwagę poświęcono roli ekranów elektrostatycznych i ich polaryzacji względem uzwojenia o konstrukcji wielowarstwowej oraz stosowaniu przepleceń zwojów i pierścieni ekwipotencjalnych w uzwojeniach cewkowych.

Badania eksperymentalne rozkładów przepięć w analizowanych modelach uzwojeń, były prowadzone w Fabryce Transformatorów ABB w Łodzi (obecnie Hitachi Energy) oraz w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej).



Zakres niniejszej rozprawy doktorskiej obejmuje:

- przedstawienie historii rozwoju transformatorów energetycznych od momentu ich wynalezienia, obecnego stanu techniki oraz przewidywanych kierunków dalszego rozwoju (Rozdział 3),
- charakterystykę podstawowych konstrukcji uzwojeń transformatorów energetycznych wysokich napięć (Rozdział 4),
- charakterystykę narażeń izolacji transformatorów od szybkozmiennych przepięć (Rozdział 5) oraz charakterystykę metod służących do modelowania i analizy zjawisk przejściowych w transformatorach (Rozdział 6),
- badania rozkładów przepięć piorunowych narażających izolację uzwojeń o konstrukcji wielowarstwowej, a także wyznaczenie rozkładu pseudo-początkowego oraz chwilowych rozkładów napięcia wzdłuż uzwojenia (Rozdział 7),
- badania wpływu polaryzacji (podłączenia, odłączenia, braku) ekranów elektrostatycznych względem uzwojenia wielowarstwowego na narażenia przepięciowe izolacji (Rozdział 7),
- symulacje rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym dla różnych konfiguracji połączenia uzwojenia i ekranów (Rozdział 7),
- analizę porównawczą rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu wielowarstwowym, otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach komputerowych oraz ocenę „skuteczności” ekranowania (Rozdział 7),
- analizę wyników badań eksperymentalnych rozkładów przepięć w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego, przy wymuszeniu udarem piorunowym oraz prostokątnym (Rozdział 8),
- wyznaczenie rozkładów pseudo-początkowych oraz chwilowych napięcia w uzwojeniu cewkowym przy oddziaływaniu udaru piorunowego oraz prostokątnego (Rozdział 8),
- symulacje rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym dla różnych metod splatania zwojów (analizowano uzwojenie zbudowane z dwucewek nawijanych metodą Chadwicka-Stearna, Kratochwila oraz van Nuysa, a także z czterocewek opartych na przeplotach Chadwicka-Stearna) oraz z zastosowaniem pierścienia ekwipotencjalnego; analizowano również koncepcję uzwojenia częściowo splatanego oraz uzwojeń o końcu izolowanym od ziemi (Rozdział 8),
- analizę porównawczą rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu cewkowym otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach (Rozdział 8).

Wyniki prac przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej mogą mieć istotne znaczenie praktyczne dla projektantów i konstruktorów transformatorów. Efektem przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych są użyteczne wnioski oraz zalecenia i rekomendacje konstrukcyjne, które mogą być użyteczne dla doskonalenia konstrukcji uzwojeń pod kątem ograniczania narażeń przepięciowych i poprawnej koordynacji izolacji uzwojeń.

### 3 Historia, stan techniki i perspektywy rozwoju transformatorów energetycznych

Transformatory są kluczowymi elementami systemu elektroenergetycznego. Ich podstawową funkcją jest zmiana parametrów prądu przemiennego, takich jak prąd, napięcie, przesunięcie fazowe, a w układach wielofazowych nawet liczba faz [57,103,107].

Podstawy teoretyczne transformatorów zostały stworzone już w XIX wieku przez Hansa Christiana Oersteda, Michaela Faradaya, Josepha Henrego, Heinricha Friedricha Emila Lenza oraz Andre Marie Ampera. Wzajemne oddziaływanie elektryczności i magnetyzmu potwierdził Oersted już w 1820r., co zainspirowało Faradaya, który w 1831r., w swoim dzienniku opisał zjawisko indukcji elektromagnetycznej, które jest podstawą działania transformatorów oraz zbudował pierwszy transformator toroidalny (Rys. 3.1). Faraday odkrył, że zmieniające się w czasie pole magnetyczne indukuje siłę elektromotoryczną w innym obwodzie, skojarzonym z tym polem. Matematyczny opis tego zjawiska został opracowany przez Lenza w 1832r. i wyrażony wzorem (3.1), przez co zależność ta jest nazywana czasem prawem Faradaya-Lenza [56,57,115,151].

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

gdzie: -  $e$  – indukowana siła elektromotoryczna,

-  $\Phi$  – strumień magnetyczny,

-  $t$  – czas.



Rys. 3.1 Pierwszy transformator toroidalny zbudowany przez Michaela Faradaya [115]

Odkrycie zjawiska indukcji elektromagnetycznej stworzyło podstawy teorii pola elektromagnetycznego i zapoczątkowało dynamiczny rozwój elektryczności i magnetyzmu. Należy również zaznaczyć znaczny wkład innych naukowców w rozwój podstaw teoretycznych elektromagnetyzmu: Wilhelma Eduarda Webera, Jamesa Clerca Maxwella oraz Hermanna Ludwiga Ferdynanda Helmholtza [57].

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya (3.4), stanowi jedno z czterech znanych i szeroko stosowanych obecnie równań Maxwella. Pozostałe trzy to: Prawo Gaussa dla elektryczności (3.2), Prawo Gaussa dla magnetyzmu (3.3) i Prawo Ampera rozszerzone przez Maxwella (3.5) [148]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.5)$$

gdzie: -  $\mathbf{D}$  – wektor indukcji elektrycznej,

-  $\rho$  - objętościowa gęstość ładunku elektrycznego,

-  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji magnetycznej,

-  $\mathbf{J}$  – wektor gęstości prądu elektrycznego,

-  $\mathbf{E}$  – wektor natężenia pola elektrycznego,

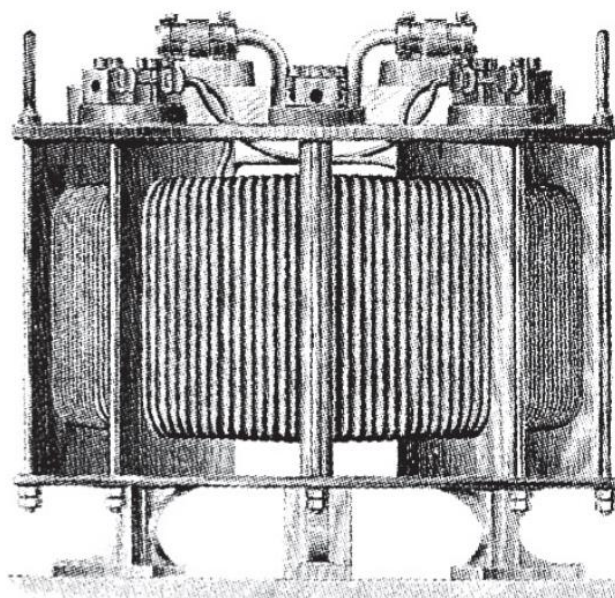
-  $\mathbf{H}$  – wektor natężenia pola magnetycznego.

Pierwszymi urządzeniami pracującymi na zasadzie indukcji elektromagnetycznej były induktry do generowania wyładowań iskrowych. Początkowo eksperymentowano z cewkami nawiniętymi na toroidalnym rdzeniu drewnianym, a następnie stalowym. Jeden z najbardziej znanych w Europie induktorów został zbudowany przez Heinricha Daniela Ruhmkorffa. Wynalazek ten był używany jako cewka zapłonowa silników spalinowych [56,57].

Od odkrycia Faradaya do powstania pierwszego komercyjnego transformatora o zamkniętym obwodzie magnetycznym wykonanym z drutu żelaznego upłynęło ponad 50 lat. Opracowany został on przez węgierską firmę Ganz (Rys. 3.2). Nazwa „transformator” została po raz pierwszy użyta w 1885r., w opisach patentowych O.T. Blathy’ego, M. Deri’egi i K. Zipernowsky’ego (pracowników firmy Ganz) oraz w artykule W.C. Rechniewskiego. W roku 1887 zaprzestano stosowania drutu do budowy rdzeni i zastąpiono je cienkimi taśmami stalowymi [56,57,115].

W tym samym czasie, w Stanach Zjednoczonych budowę transformatorów rozpoczęła firma Westinghouse Electric and Manufacturing Company i uruchomiła znacznie nowocześniejszą i lepszą technologicznie produkcję transformatorów, w porównaniu do firmy Ganz. Firma Westinghouse już w 1887 roku zastosowała rdzenie składane z wykrojów blach oraz olejowe chłodzenie transformatorów. Były to czasy intensywnej walki konkurencyjnej z firmą Edison Electric Light Company, która była przeciwna wprowadzaniu prądu przemiennego. Dzięki wynalazkom m.in. Nicolii Tesli i Elihu Thomsona, firma Westinghouse stała się potęgą w dziedzinie ówczesnej elektrotechniki [56,57].

Kolejnymi krajami, po Węgrzech i Stanach Zjednoczonych, w których uruchomiono produkcję transformatorów były m.in. Wielka Brytania, Szwajcaria, Niemcy, Francja, Belgia, Włochy i Hiszpania. Do rozwoju transformatorów znacząco przyczynili się europejscy wynalazcy: S. Ziani de Ferranti, W.M. Mordey i W.E. Webber, J. Swinburne, czy L. Hall [56,57].

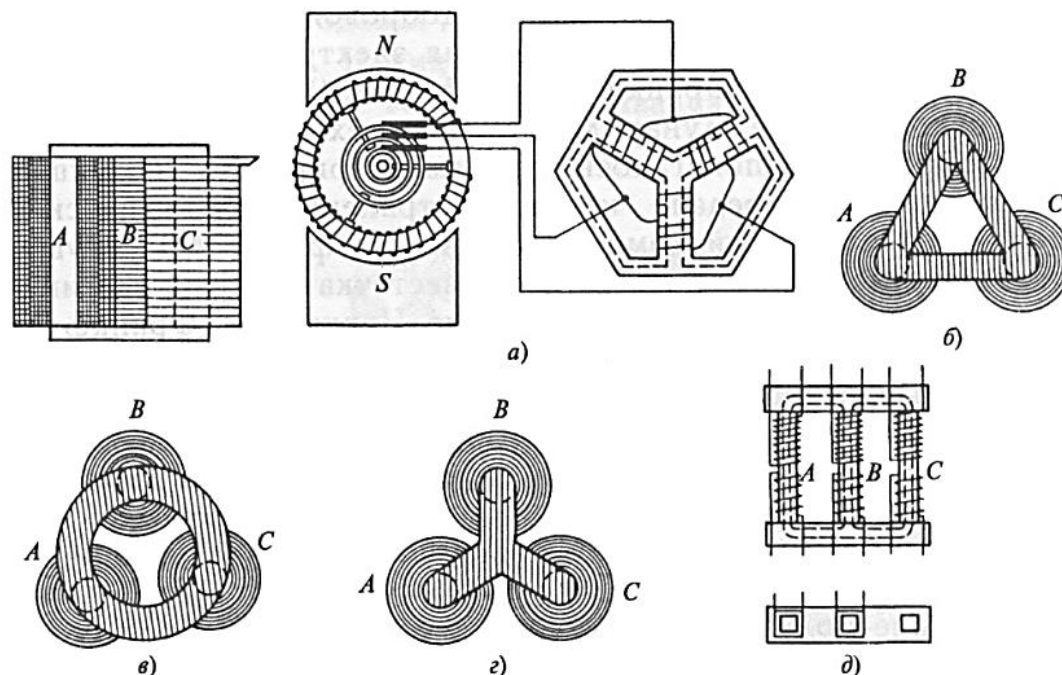


*Rys. 3.2 Transformator rdzeniowy o mocy 7,5 kW firmy Ganz zbudowany w 1885 r. [115]*

Od momentu rozpoczęcia produkcji transformatorów, rosły konflikty pomiędzy zwolennikami prądu stałego oraz prądu przemiennego, zwane „bitwą o prąd”. Za prądem stałym przemawiały akumulatory zdolne gromadzić energię elektryczną, względnie niskie napięcie oraz dość zaawansowana, jak na ówczesne czasy, produkcja silników prądu stałego. Zaletą prądu przemiennego była oszczędność miedzi przez zastosowanie przesylu pod wysokim napięciem (dzięki transformatorom). Zwolennikami prądu stałego byli: Thomas Alva Edison, Rookes Evelyn B. Crompton i Ernst Werner von Siemens oraz Lord Kelvin. Do grupy opowiadającej się za wprowadzeniem prądu przemiennego zaliczali się: Michał Doliwo-Dobrowolski, Sebastian Ziani de Ferranti, Nicola Tesla, George Westinghouse oraz wynalazcy transformatora z Węgier. Ostatecznie, „bitwa o prąd” zakończyła się zwycięstwem prądu przemiennego ze względów technicznych i ekonomicznych [56,57,151].

Jednym z pierwszych wynalazców transformatora trójfazowego był Michał Doliwo-Dobrowolski [151]. W 1889 r. opatentował on koncepcje transformatorów trójfazowych kolumnowych z jarzmem pierścieniowym, tarczowym i gwiazdowym (Rys. 3.3), korzystając z faktu, że suma trzech strumieni magnetycznych jest równa zero. W późniejszym czasie stosowano już rdzenie o planarnym ułożeniu kolumn i jarzma. Początkowo, w układach trójfazowych stosowano zespoły trzech transformatorów jednofazowych połączonych w gwiazdę. Pierwsze transformatory trójfazowe o uzwojeniach pierwotnych i wtórnych połączonych w gwiazdę bez przewodu zerowego, zostały wyprodukowane przez niemiecką firmę AEG [56,57,151].

Pod koniec wieku XIX produkowano już urządzenia o mocy do 1000 kVA i napięciu do 40 kV. W XX wieku nastąpił bardzo szybki rozwój w dziedzinie transformatorów. Wynikało to z powszechnego rozwoju systemów zasilania i rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Rozwój systemów elektroenergetycznych i transformatorów wzajemnie się napędzał. W 1928 r. istniał już transformator o mocy 45 MVA i napięciu 110 kV, w 1970 r. o mocy 270 MVA i napięciu 420 kV, a w 1978 r. o mocy 500 MVA i napięciu 750 kV [56,57,151].



Rys. 3.3 Koncepcje trójfazowych transformatorów Michala Doliwo-Dobrowolskiego: generator zasilający transformator z promieniowym rozmieszczeniem rdzeni i jarzmem o budowie: b) trójkątnej, c) pierścieniowej, d) gwiazdowej i e) prostoliniowej [211]

Pierwsze informacje o transformatorach w języku polskim zostały opublikowane przez B. Gustawicza w 1913 r. w Warszawie, w książce [94], a następnie przez T.M. Arlitewicza w 1916 i 1917 r. we Lwowie. Pierwsze książki poświęcone tematyce transformatorów są autorstwa Walentego Koczyńskiego oraz Eugeniusza Jezierskiego [56,57].

Rozwój transformatorów był możliwy dzięki wysiłkom wielu osób, środowisk naukowych i firm. Do powstania teorii przyszłych transformatorów w kontekście zjawisk magnetycznych, obliczeń obwodu magnetycznego, strat histerezowych i wiropędowych, przyczynili się szczególnie (oprócz wspomnianych wcześniej): H. Helmholtz, bracia J. i E. Hopkinsonowie, J.A. Ewing, K.A.R. Steinmetz, i G. Kaap oraz ich współpracownicy [57].

Postęp w rozwoju transformatorów był możliwy nie tylko dzięki rozwojowi podstaw teoretycznych, ale również dzięki ciągłemu doskonaleniu konstrukcji rdzenia, uzwojeń, kadzi oraz procesów produkcji. Niezawodne transformatory musiały sprostać wymaganiom elektrycznym, mechanicznym i cieplnym, dlatego szczególną rolę w rozwoju transformatorów odegrał postęp w dziedzinie materiałów, szczególnie ferromagnetycznych i elektroizolacyjnych [253].

Sposób wykonania rdzenia i materiał, z którego jest zbudowany, w znacznym stopniu decyduje o właściwościach transformatora (krzywa  $B=f(H)$ , indukcja nasycenia, straty histerezowe i wiropądowe). Pierwsze transformatory miały rdzenie wykonane z drutu stalowego o małej zawartości węgla. Początkowo były to rdzenie otwarte, następnie zamknięte. Właściwości magnetyczne drutów stalowych były bardzo słabe, a indukcja nie mogła przekroczyć 0,5 T. Aby zapewnić izolację elektryczną i ograniczyć straty od prądów wirowych, druty były pokryte lakierem lub warstwą tlenku żelaza. Zastosowanie rdzeni wykonanych z cienkich blach, znacząco poprawiło właściwości transformatorów i umożliwiło zwiększenie indukcji do ok. 1 T. Niemniej jednak, cały czas rdzenie cechowała wysoka stratność. Zainicjowało to prace nad nowymi blachami o mniejszych stratach. W 1906 r. uruchomiono produkcję blachy stalowej krzemowej o zwiększonej rezystywności i indukcji nasycenia. Kolejnym przełomem w rozwoju materiałów magnetycznych na rdzenie, było wynalezienie metody wytwarzania blach o właściwościach anizotropowych, początkowo gorąco-, później zimnowalcowanych. Umożliwiło to uzyskanie materiału o większej indukcji nasycenia i przenikalności magnetycznej oraz o niższych stratach histerezowych i wiropądowych [57].

Prace i postęp w dziedzinie materiałów ferromagnetycznych trwają do dzisiaj. Warto wspomnieć również o rozwoju innych materiałów, które są stosowane do budowy rdzeni transformatorów (nie tylko energetycznych), takich jak: blachy amorficzne, nanokrystaliczne, czy też ferryty. Czasem, w celu poprawienia parametrów, lub osiągnięcia innego, zamierzonego celu stosuje się kombinacje różnych materiałów w jednej konstrukcji tworząc tzw. rdzenie hybrydowe, opisane m.in. w [48] i [221]. Wspomniane wcześniej materiały, cechują się określonymi właściwościami, które determinują kształt i sposób wykonania rdzenia jako rdzenia zwijanych, składanych z wykrojów blach, czy też spiekanych. Kształty rdzeni jakie najczęściej są stosowane obecnie w różnych rodzajach transformatorów to: kolumnowe (płaskie i trójkątne) oraz toroidalne [249].

Innym szczególnie ważnym aspektem, który wpływał na rozwój transformatorów i poprawę ich niezawodności, był postęp w dziedzinie układów i materiałów izolacyjnych. Trzeba zaznaczyć, że stosowanie materiałów elektroizolacyjnych w transformatorach, to „zło konieczne” – zwiększają koszt budowy, izolują cieplnie uzwojenia i utrudniają ich chłodzenie, podczas gdy nie biorą udziału w samym transformowaniu energii. Niemniej jednak, ich stosowanie jest konieczne do zapewnienia bezpiecznej eksploatacji transformatorów i poprawy ich parametrów bez konieczności znacznego zwiększania wymiarów. Izolacja transformatorów jest poddawana działaniu narażeń mechanicznych, cieplnych, elektrycznych i chemicznych. Elementy izolacyjne są najbardziej delikatnymi elementami i najczęściej ulegają uszkodzeniu, przez co mają kluczowy wpływ na trwałość transformatora [57,151,253].

Pierwsze transformatory były transformatorami suchymi – posiadały izolację uzwojeń wykonaną najczęściej z bawełny i były chłodzone naturalnym obiegiem powietrza, przez co ich moc znamionowa była mocno ograniczona, aby nie przekroczyć dopuszczalnych przyrostów temperatury. Następnie, zastosowano olej mineralny, który pełnił funkcję chłodzącą i izolacyjną, a cały transformator umieszczono w szczelnym pojemniku metalowym. Ponieważ, izolacja bawełniana chłoneła wilgoć i powodowała tworzenie się mostków przewodzących w oleju pomiędzy elementami o różnych potencjałach, rozpoczęto prace nad jej zastąpieniem. Szczególnie korzystnym i tanim rozwiązaniem okazał się papier celulozowy oraz twardy

preszpan. Celuloza była łatwa w formowaniu i dobrze impregnowalna w oleju. Zastosowanie przegród, tulei izolacyjnych, pierścieni itp., oraz ich odpowiednie kształtowanie, umożliwiło znaczne zmniejszenie odległości pomiędzy elementami uziemionymi oraz znajdującymi się pod napięciem [57]. Ze względu na swoje właściwości i niskie koszty, izolacja papierowo-olejowa jest stosowana do dzisiaj, zarówno w transformatorach rozdzielczych jak i w transformatorach mocy (Rys. 3.4). Znacząco poprawiona została jednak technologia wytwarzania elementów izolacyjnych i ich jakość (czystość). W dalszych latach na izolację uzwojeń zaczęto stosować również inne materiały, o lepszych właściwościach cieplnych i mechanicznych niż celuloza, np. NOMEX [151,253]. Cały czas trwają prace nad badaniem wpływu różnych czynników np. zawilgocenia, temperatury, starzenia, itp. na parametry eksploatacyjne izolacji papierowej oraz nad poprawą jej wytrzymałości elektrycznej [153,175,193].

Olej elektroizolacyjny do zastosowań w transformatorach był (i nadal jest) przedmiotem wyężonych badań i analiz. Pracowano głównie nad poprawą jego właściwości cieplnych, izolacyjnych, chemicznych, reologicznych, odporności na wilgoć, ograniczeniem korozyjności, analizą procesu starzenia i zmiany parametrów w czasie eksploatacji i w funkcji zawartości wilgoci. Badany jest również wpływ rodzaju i polaryzacji napięcia na wytrzymałość dielektryczną olejów, np. w [190,191]. Obecnie oprócz oleju mineralnego, w transformatorach stosuje się oleje innego typu, np. estry syntetyczne, estry naturalne, oleje bio-pochodne, itp. [192,238]. Dostępne są oleje w szerokim zakresie parametrów i kosztów - w zależności od aplikacji, wymaganych parametrów i kosztów można zastosować różne typy olejów. W dobie szczególnej troski o środowisko naturalne, bardzo popularne są oleje biodegradowalne i recyklowalne. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem olejów pochodzenia roślinnego jako alternatywy dla oleju mineralnego i syntetycznego [21,108,151,170,194,253].



*Rys. 3.4 Transformator rozdzielczy (z lewej) oraz transformator mocy na stacji prób (z prawej), wyprodukowane przez ABB [212] – uzwojenia transformatora mocy są obiektami analizowanymi w niniejszej pracy*

Nie sposób nie wspomnieć o transformatorach w izolacji żywicznej (tzw. suchych), które były przełomowymi konstrukcjami. Dzięki zastosowaniu żywicy i odpowiedniego procesu produkcji, zbudowano transformatory cechujące się wysoką odpornością mechaniczną,

brakiem wycieków i niepalnością, w porównaniu do konstrukcji papierowo-olejowych. Znacząco poprawiło się bezpieczeństwo. Transformatory suche produkuje się w różnych odmianach, które różnią się sposobem wykonania – nawijane na mokro (izolację stanowi włókno szklane przesączone żywicą), odlewane próżniowo, lakierowane. Transformatory suche, ze względu na znacznie wyższy koszt w porównaniu do olejowych, są stosowane znacznie rzadziej, ale są szczególnie popularne w miejscach, w których kluczowe jest bezpieczeństwo. Przykłady różnych typów transformatorów o izolacji żywicznej, produkcji ABB, przedstawiono na Rys. 3.5. Transformatory suche są cały czas udoskonalane, zarówno pod kątem ich konstrukcji, procesów produkcji, czy też zastosowania nowych materiałów [161,196,239].



Rys. 3.5 Transformatory suche ABB wykonane w technologii: Resibloc, VCC (Vacuum Cast Coil), Open Wound [212]

Oprócz transformatorów o izolacji olejowej i żywicznej, prowadzone są również prace nad zastosowaniem izolacji w formie żelu, czyli stanu pośredniego pomiędzy izolacją twardą (żywiczną), a ciekłą. Takie konstrukcje łączą w sobie pewne cechy obu tych rozwiązań (zarówno zalety, jak i wady). Bardzo ciekawa koncepcja dotyczy zastosowania żelu na bazie oleju, który wykazuje przejście fazowe ze stanu stałego do ciekłego pod wpływem zmian temperatury. Przy wzroście temperatury powyżej pewnej, ściśle określonej wartości, następuje szybki spadek lepkości i żel przechodzi ze stanu stałego do stanu ciekłego umożliwiając lepsze chłodzenie, a po schłodzeniu, ponownie wraca do stanu żelowego (proces jest odwracalny). Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia zagrożeń środowiskowych, ponieważ w przypadku rozszczelnienia kadzi, olej nie wniknie w głąb, tylko pozostanie w formie żelu na powierzchni gleby i będzie łatwy do usunięcia [124]. Izolację w formie żelu olejowego uzyskuje się przez dodanie odpowiednich ilości dodatków żelujących do oleju bazowego, a następnie obróbkę termiczno-mechaniczną [4,146].

W latach 60-tych XX wieku rozpoczęto prace nad transformatorami o izolacji gazowej SF<sub>6</sub> pod ciśnieniem. Główne zalety transformatorów gazowych to ich niepalność, niewybuchowość oraz kompaktowość. Temperatura zapłonu SF<sub>6</sub> jest znacznie wyższa niż olejów izolacyjnych, a kadź ciśnieniowa posiada bardzo dużą wytrzymałość mechaniczną. Bardzo istotne jest również uproszczenie instalacji (brak zalewania cieczą) i eksploatacji (jedynie pomiar ciśnienia gazu). Przy transformatorach dystrybucyjnych małej mocy, ogólna koncepcja jest zbliżona do transformatorów olejowych, natomiast w przypadku większych mocy konieczne jest zastosowanie wymuszonego chłodzenia gazem oraz materiałów



izolacyjnych o podwyższonej odporności termicznej [39,151,152]. Znacznie trudniejszym rozwiązaniem są natomiast transformatory wysokich napięć, o dużych mocach znamionowych. Technologia i zastosowanie transformatorów gazowych najbardziej rozwinęła się w Japonii (głównie Toshiba, Mitsubishi i Hitachi), ze względu na powszechność stacji izolowanych gazem SF<sub>6</sub>. Obecnie, transformatory izolowane SF<sub>6</sub> są produkowane w zakresach napięć od 20 kV do 500 kV, a moce znamionowe sięgają 500 MVA [39]. Pomimo wymienionych zalet, transformatory izolowane SF<sub>6</sub> nie są stosowane równie często co transformatory suche i olejowe [46,113,217,226].

Ze względu na aspekty ekologiczne związane z SF<sub>6</sub>, cały czas trwają prace nad alternatywnymi gazami, które spełniłyby wysokie wymagania stawiane materiałom elektroizolacyjnym. Prace dotyczą nie tylko zastosowań w transformatorach, ale również innych urządzeniach elektroenergetycznych, takich jak np. rozdzielnice, wyłączniki, przekładniki, stacje oraz linie izolowane gazem (*GIS – Gas Insulated Substation*, *GIL - Gas Insulated Line*), itp. Obecnie, jako alternatywa dla SF<sub>6</sub> stosowane są m.in.: suche powietrze (*Dry Air*), *AirPlus* (suche powietrze z domieszką fluoroketonów C5), dwutlenek węgla CO<sub>2</sub>, azot N<sub>2</sub>, mieszanina SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>, mieszanina N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> oraz inne [87,125,165,184,213,222,232].

Od lat trwają również prace nad transformatorami nadprzewodzącymi (kriogenicznymi). Takie rozwiązania posiadają szereg zalet, z których szczególnie istotne są: kompaktowość, redukcja masy, znaczące wyeliminowanie strat i wysoka sprawność. Badania nad transformatorami kriogenicznymi obejmują konstrukcje wykorzystujące nadprzewodnictwo zarówno nisko-, jak i wysokotemperaturowe. Obecnie transformatory nadprzewodzące nie są powszechnie stosowane, głównie ze względu na czynniki ekonomiczne i wyzwania techniczne – wykorzystuje się je głównie w specjalnych aplikacjach i w jednostkach badawczych [151,252].

Bardzo ważnymi elementami izolacyjnym, które przyczyniły się do dalszej miniaturyzacji transformatorów są izolatory przepustowe umożliwiające wyprowadzenie elementów o wysokim potencjale poza każdą. W 1906 roku wynaleziono konstrukcję izolatora kondensatorowego, o równomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego (ta koncepcja jest stosowana do dzisiaj). Obecnie powszechnie stosowane są izolatory przepustowe o izolacji papierowo-olejowej (*OIP*), typu *RIP* (papier impregnowany żywicą), *RIS* (siatka syntetyczna impregnowana żywicą), ale cały czas trwają prace nad wprowadzeniem nowych materiałów oraz metod produkcji, które obniżą koszty i usprawnią proces wytwarzania oraz zwiększą niezawodność. Przepusty kondensatorowe mogą być umieszczone wewnątrz izolatorów porcelanowych, kompozytowych lub w całości wykonane z żywicy [5,43,151].

Rozwój technologii w transformatorach dotyczy również podobciążeniowego przełącznika zaczepów. Obecne trendy obejmują projektowanie i budowę energoelektronicznych przełączników zaczepów, np. [18,19,202].

W ostatnich dekadach, a szczególnie obecnie, powszechnym zagadnieniem w rozwoju transformatorów jest ekologia. W przypadku bezawaryjnej pracy, transformator nie stanowi dużego niebezpieczeństwa, ale w czasie wystąpienia awarii, może stanowić znaczne zagrożenie dla środowiska naturalnego. Bardzo ważne są aspekty zanieczyszczenia chemicznego w przypadku wycieku, lub wybuchu transformatora olejowego. Olej może doprowadzić do

skażenia gleby, zbiorników wodnych oraz wód gruntowych [35]. Zagrożenie wzrasta wraz ze starzeniem się oleju w czasie eksploatacji. Olej mineralny coraz częściej zastępuje się olejami silikonowymi lub estrami syntetycznymi oraz organicznymi, które cechują się bardzo małą toksycznością i dużym stopniem biodegradowalności [21,151,194]. W niektórych aplikacjach, stosowanie izolacji ciekłej jest jednak zakazane i wymagane jest zastosowanie transformatorów suchych. Rozwijane są również koncepcje bazujące na wspomnianej wcześniej izolacji żelowej.

W przypadku transformatorów izolowanych SF<sub>6</sub>, pomimo szeregu zalet, pojawia się problem z toksycznymi produktami rozkładu; dodatkowo sześć fluorków siarki jest gazem o dużym potencjale cieplarnianym [51,151]. Izolacja żywiczna również nie jest w pełni bezpieczna – ze względu na obecność bezwodnikowych utwardzaczy, które są substancjami uczulającymi drogi oddechowe. Ich stosowanie wiąże się z zagrożeniami dla personelu zakładów produkcyjnych. Niektóre bezwodniki znajdują się na liście kandydackiej SVHC (substancje wzbudzające szczególnie duże obawy) rozporządzenia REACH i są znakowane R42. Aspekty te, są motorem napędowym prac nad nowymi, bezpiecznymi formułami żywic epoksydowych, jak np. w [31].

Do aktualnych kierunków rozwoju transformatorów należy zaliczyć również globalny trend ograniczania śladu węglowego i emisji CO<sub>2</sub>, tzw. zrównoważony rozwój. Obejmuje on zastosowanie ekologicznych oraz recyklowalnych materiałów do budowy transformatorów (oraz innych układów i urządzeń elektroenergetycznych) oraz szacownie środowiskowej oceny cyklu życia (ang. *LCA – Life Cycle Assessment*), która uwzględnia całościowe potencjalne zagrożenie środowiskowe związane z danym urządzeniem (od rozpoczęcia produkcji do końca eksploatacji). Wytwórcy transformatorów poświęcają sporo uwagi zrównoważonemu rozwojowi produktów, np. program Sustainability w ABB, czy EconiQ w Hitachi Energy [209,210].

Do aspektów środowiskowych należy zaliczyć również hałas generowany przez transformatory ze względu na zjawisko magnetostrykcji rdzenia oraz pracę wentylatorów [40,65,129,151]. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku zastosowania transformatorów w pobliżu zabudowań oraz w miejscach silnie zurbanizowanych. Prowadzone są ciągłe prace nad redukcją hałasu, zarówno aktywną (przez zastosowanie głośników emitujących szum akustyczny w przeciwfazie do szumu transformatora, jak i pasywną (przez stosowanie nowych materiałów na rdzenie, obniżanie indukcji, czy też instalowanie ekranów akustycznych) [32,44,116]. Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem pomiarów wibroakustycznych jako metody diagnostycznej stanu transformatora oraz nad doskonaleniem metod obliczeń akustycznych transformatorów [237,256].

Oczywistym aspektem środowiskowym (i równocześnie ekonomicznym) są straty mocy w transformatorach – jałowe i obciążeniowe oraz w konstrukcyjnych elementach transformatorów [105,240,250,251]. Część energii wygenerowanej w elektrowniach jest zużywana na pokrycie strat w transformatorze. Biorąc pod uwagę liczbę transformatorów zainstalowanych w całym systemie elektroenergetycznym, problem ten jest jednym z kluczowych aspektów od samego początku rozwoju transformatorów. Redukcja strat stanowi jeden z najważniejszych aspektów rozwoju współczesnych transformatorów [118,151].

Ograniczenie pola elektromagnetycznego emitowanego przez transformatory jest również przedmiotem prac naukowców i inżynierów. Przy częstotliwości 50 Hz rozpatruje się oddzielnie składową elektryczną i magnetyczną. W obecnych konstrukcjach transformatorów, poziom pola elektrycznego i magnetycznego nie jest wysoki, ale nadal należy ten aspekt rozważać w kontekście zagrożeń środowiskowych [151].

Od rozpoczęcia produkcji pierwszych transformatorów, z biegiem lat trwały prace nad poprawieniem parametrów transformatorów oraz ograniczeniem wpływu narażeń cieplnych, mechanicznych i elektrycznych na ich trwałość. Prace te obejmowały poprawienie konstrukcji uzwojeń i ich odporności na przepięcia [7,10], nowe technologie produkcji (np. zastosowanie przewodów transponowanych) [253], wymuszony i sterowany obieg oleju [151], itp.

Tematyka związana z oddziaływaniem przepięć na transformatory, która jest przedmiotem analizy w niniejszej pracy, jest bardzo obszerna i obejmuje przepięcia różnego pochodzenia: atmosferyczne, łączeniowe, rezonansowe, długotrwałe, itp. W zależności od źródła przepięcia, jego wartości maksymalnej, kształtu i czasu oddziaływania, jego wpływ na izolację transformatorów jest odmienny. Co więcej, kluczowa jest również budowa samego uzwojenia, szczególnie zastosowanie ekranów lub zwojów ekranujących, pierścieni ekwipotencjalnych oraz przeplatania zwojów. Z tego względu problematyka ta jest cały czas aktualna i prowadzone są ciągle prace w każdym z tych obszarów. Istotną rolę odgrywają również analizy przepięć przenoszonych przez transformatory oraz przepięć rezonansowych [7,11,72,73,78,79,82,120,135,136,137,169,204].

Równolegle do prac związanych z rozwojem konstrukcji transformatorów, pracowano również nad systemami diagnostycznymi, monitoringiem, wymaganiami probierczymi i eksploatacyjnymi oraz systemami wspomagającymi projektowanie transformatorów, opartymi na wieloletnich doświadczeniach i uwzględniających aktualne trendy i odkrycia [253].

Najnowsze trendy w dziedzinie transformatorów, poza wspomnianymi wcześniej aspektami materiałowymi, środowiskowymi i ekonomicznymi, dotyczą doskonalenia metod diagnostycznych [74], szczególnie detekcji poziomu wyładowań niepełnych (wnz), analizy form i lokalizacji występowania [38,73], badania charakterystyk częstotliwościowych *FRA* (*Frequency Response Analysis*) [78], badań jakości oleju wraz z analizą chromatograficzną gazów *DGA* (*Dissolved Gas Analysis*) [109,149,255], badania stanu przepustów transformatorowych [167], itp. Bardzo popularnym kierunkiem jest projektowanie, budowanie i instalowanie systemów monitorujących aktualne parametry pracy transformatorów oraz ich ogólny stan i alarmujących w przypadku wykrycia zagrożenia lub przekroczenia określonych parametrów krytycznych [54,109,149,176,203,242,247]. Systemy te są wyposażone w różnego rodzaju czujniki, takie jak np. czujnik temperatury, ciśnienia, wilgotności, poziomu wnz, itp. oraz bazują na algorytmach uczenia maszynowego. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie prewencyjnej naprawy lub konserwacji, lepsze planowanie koniecznych remontów, a nawet szacowanie końca życia transformatora na podstawie badanych parametrów [66,106,185]. Popularne są również systemy do ciągłego osuszania oleju w czasie eksploatacji, przez zastosowanie wymuszonego przepływu cieczy przez kartridże zawierające granulaty absorbujące wilgoć [41].

Problematyka rozwoju transformatorów energetycznych obejmuje również zagadnienia techniki komputerowej i wykorzystanie programów komputerowych do wspomagania projektowania urządzeń i obliczeniowej, symulacyjnej analizy zjawisk fizycznych. Dotyczy to zarówno programów do analiz polowych bazujących na metodzie elementów skończonych, metodzie elementów brzegowych, metodzie różnic skończonych (np. ANSYS, FLUX, COMSOL Multiphysics, CST, itp.), jak i obwodowych (np. ATP-EMTP, PS CAD, LT SPICE, itp.) [120,253].

Transformatory są stosowane obecnie niemal w każdej dziedzinie życia bazującej na elektryczności – od samego wytworzenia energii, transformacji do poziomu napięć przesyłowych, następnie rozdzielczych SN (średniego napięcia) i nN (niskiego napięcia), aż po aplikacje przemysłowe oraz domowe. Transformatory znalazły również zastosowanie w dziedzinie pomiarowej i zabezpieczeniowej. Rodzaje transformatorów jakie można obecnie spotkać to m.in.: transformatory blokowe, stacyjne WN/SN, rozdzielcze SN/nN, transformatory sprzęgające, autotransformatory, przesuwniki fazowe, transformatory spawalnicze, przekładniki napięciowe i prądowe do zastosowań pomiarowych i zabezpieczających, transformatory impulsowe i przekształtnikowe, transformatory średniej i wysokiej częstotliwości (np. transformator Tesli), itp. [67,151,179,189,253]. Należy zaznaczyć również inne aplikacje, które są szczególnie ważne w ostatnich latach – m.in. transformatory w wykonaniu przeciwwybuchowym, transformatory do turbin wiatrowych, a także transformatory podwodne pracujące na głębokościach do 3000 m [30,220,229,243].

Transformatory przekształtnikowe *HVDC* (Rys. 3.6) stanowią odrębny, szczególnie ważny temat badawczy ze względu na ich rozwój w ostatnich latach [248]. Systemy *HVDC* (*High Voltage Direct Current*) służą do przesyłania energii elektrycznej na duże odległości. Kluczowe problemy dotyczą między innymi zagadnień izolacyjnych ze względu na występowanie składowej stałej napięcia *DC* nakładającej się na napięcie przemiennie i udarowe. Układ izolacyjny jest w czasie eksploatacji poddawany złożonym naprężeniom *AC* i *DC* [150,155].

Bardzo ważnym aspektem, który nie był wcześniej wspomniany, jest również transport oraz instalacja transformatorów w miejscu przeznaczenia. Jest to bardzo trudne i wymagające przedsięwzięcie, wymuszające współpracę wielu organów. Ograniczenia transportowe, dotyczące maksymalnej masy jak i wymiarów, są jednymi z czynników ograniczających wzrost mocy znamionowych współczesnych transformatorów powyżej pewnych wartości [50].

Obecnie największe transformatory mocy są konstruowane na napięciu powyżej 1 MV, a największe moce sięgają poziomów 1,63 GVA [63,212,214]. Ze względu na koszty produkcji, instalacji oraz wymagania zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców, transformatory muszą cechować się wysoką niezawodnością, odpornością na różne narażenia występujące w czasie prób i w eksploatacji oraz cechować się czasem życia na poziomie minimum 30 lat.



*Rys. 3.6 Transformator HVDC produkcji ABB na stacji prób [212]*

Pomimo, że transformatory energetyczne są obecnie bardzo dojrzałymi i zaawansowanymi technicznie i technologicznie urządzeniami, konieczny jest ich dalszy, wielotorowy rozwój. Ma to na celu poprawę niezawodności przez zastosowanie nowych, lepszych materiałów, poprawę konstrukcji, ograniczenie narażeń eksploatacyjnych i probierczych (jak oddziaływanie przepięć), obniżenie kosztów produkcji i eksploatacji, zmniejszenie zagrożeń środowiskowych, doskonalenie metod testowych, diagnostycznych, obliczeniowych oraz systemów monitorowania i predykcji końca życia, itp. Niniejsza rozprawa stanowi część tych prac, poprzez analizę badawczą i symulacyjną narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach i topologiach.

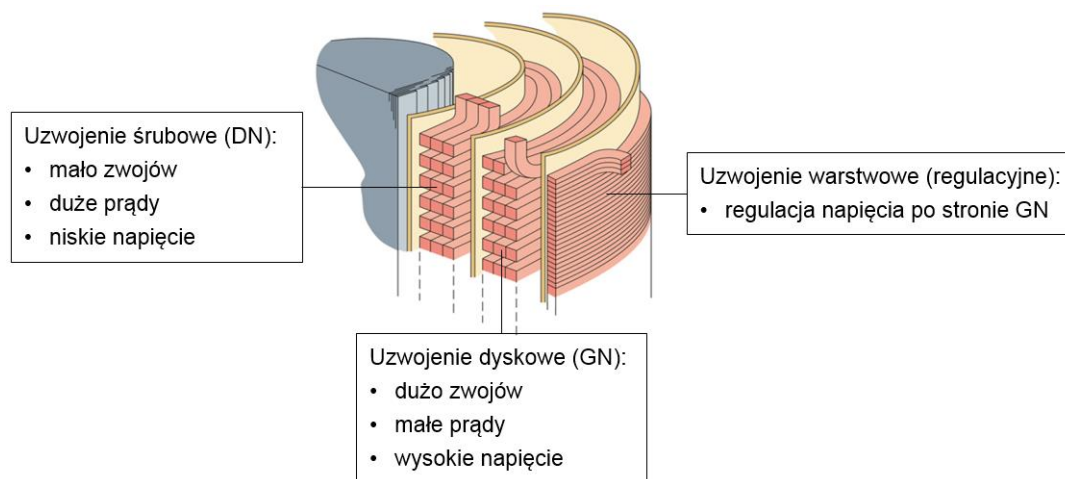
## 4 Uzwojenia wysokonapięciowych transformatorów energetycznych

Uzwojenia wysokonapięciowych transformatorów energetycznych (nazywanych często transformatorami mocy) są obiektami o złożonej i różnorodnej budowie. Są one, razem z rdzeniem magnetycznym, najważniejszymi elementami każdego transformatora i pełnią w nim najbardziej odpowiedzialne funkcje. Ich konstrukcja powinna zapewnić transformatorowi odpowiednie warunki pracy zarówno pod względem elektrycznym, mechanicznym i cieplnym. Z tego względu, uzwojenia powinny być zaprojektowane z uwzględnieniem najnowszych wytycznych i standardów i wykonane w odpowiedni sposób, z materiałów o odpowiedniej jakości i parametrach oraz z zachowaniem odpowiednich tolerancji produkcyjnych [105,182].

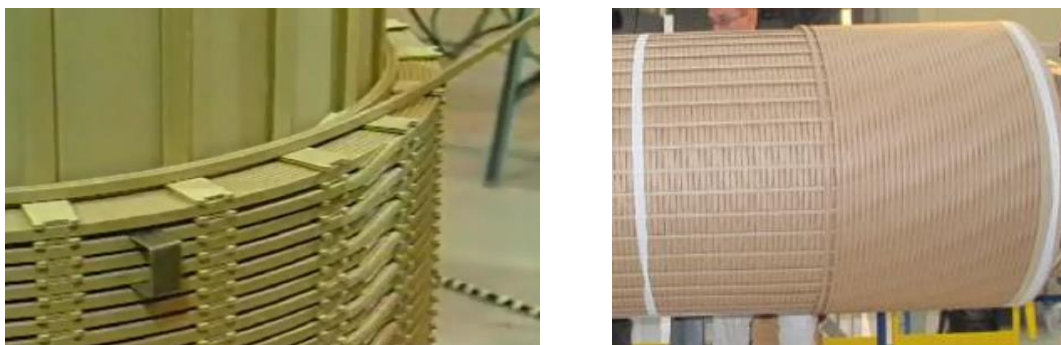
Rodzaj oraz sposób wykonania uzwojenia zależy przede wszystkim od poziomu napięcia i mocy znamionowej na jakie jest ono projektowane. Napięcie znamionowe uzwojenia jest parametrem, który decyduje o typie izolacji i liczbie zwojów. Moc razem z napięciem określa prąd, a więc również wymagane pole powierzchni przekroju przewodu nawojowego.

W praktyce, w transformatorach wysokich napięć, powszechnie stosuje się kilka typów uzwojeń. Ich podstawowy podział konstrukcyjny wynika zarówno ze sposobu wzajemnego ułożenia uzwojenia górnego i dolnego napięcia na kolumnie rdzenia (uzwojenia współosiowe i krążkowe), jak i ze sposobu ułożenia zwojów drutu nawojowego – uzwojenia cewkowe (dyskowe), śrubowe i warstwowe [13,82,83,95,105,182,223].

W Polsce, w transformatorach energetycznych, na uzwojenia wysokiego napięcia stosuje się zazwyczaj konstrukcje cewkowe. Uzwojenia dolnego napięcia budowane są przeważnie jako śrubowe, czasem jako warstwowe, a rzadko jako cewkowe. Uzwojenia o konstrukcji warstwowej są stosowane w dużych transformatorach głównie na uzwojenia regulacyjne [13,95,105,110,182,223]. Charakterystyczne cechy poszczególnych typów uzwojeń stosowanych w wysokonapięciowych transformatorach energetycznych zestawiono na Rys. 4.1. Na Rys. 4.2 przedstawiono zdjęcia uzwojenia cewkowego i warstwowego.



Rys. 4.1 Podstawowe cechy uzwojeń stosowanych w transformatorach mocy [13]

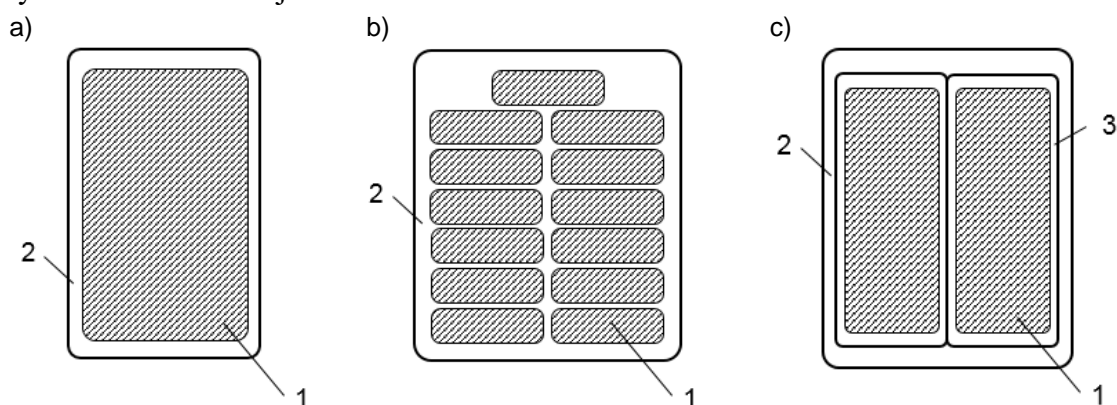


Rys. 4.2 Uzwojenie cewkowe (z lewej) oraz warstwowe (z prawej) w czasie nawijania [63]

Uzwojenia wysokiego napięcia transformatorów mocy nawija się przeważnie przewodami miedzianymi o różnorodnej budowie i kształcie. Najczęściej stosowane są [33,182]:

- przewody profilowane o przekroju prostokątnym w oplocie papierowym (Rys. 4.3a) – czasem żyła robocza przewodu jest dodatkowo pokryta cienką warstwą emalii izolacyjnej,
- przewody wielożyłowe o ciągłej transpozycji (CTŻ) w oplocie papierowym (Rys. 4.3b) – taki przewód składa się z kilku do kilkudziesięciu żył roboczych o niewielkim przekroju, przeplecionych ze sobą w sposób ciągły. Poszczególne żyły robocze są izolowane od siebie cienką warstwą emalii izolacyjnej oraz pokryte cienką warstwą żywicy, która w czasie procesu suszenia uzwojenia utwardza się sklejając poszczególne żyły robocze ze sobą. Przewód CTŻ jest prostszy w nawijaniu w porównaniu do przewodu profilowanego prostokątnego, co jest istotne szczególnie w przypadku konieczności zastosowania dużych przekrojów przewodów. Przewody wielożyłowe cechują się również mniejszymi stratami dodatkowymi wywołanymi prądami wirowymi w uzwojeniu,
- przewody „bliźniacze” (Rys. 4.3c) – są to dwa równoległe przewody profilowane lub CTŻ, każdy w izolacji papierowej, zaizolowane dodatkowo wspólnym oplotem papierowym.

W praktyce spotykane są również inne rodzaje przewodów nawojowych (np. okrągłe), ale w transformatorach energetycznych (wysokonapięciowych) stosowane są głównie te wymienione wcześniej.



Rys. 4.3 Uproszczone przekroje typowych przewodów nawojowych stosowanych w uzwojeniach wysokonapięciowych transformatorów energetycznych: a) przewód profilowany prostokątny, b) przewód o ciągłej transpozycji żył, c) przewód typu bliźniak; 1 – żyła robocza, 2 – oplot papierowy, 3 – izolacja papierowa przewodów bliźniaczych

W dalszej części rozdziału zostaną dokładniej scharakteryzowane jedynie uzwojenia typu cewkowego oraz warstwowego, ponieważ są one podstawowymi konstrukcjami stosowanymi w uzwojeniach transformatorów wysokich napięć.

## 4.1 Uzwojenia cewkowe wysokiego napięcia

W Polsce uzwojenia cewkowe w transformatorach dominują od poziomu napięcia 110 kV [110]. Zbudowane są one z płaskich, spiralnych dysków (cewek) nałożonych na kolumnę rdzenia i przedzielonych między sobą kanałami olejowymi oraz przekładkami dielektrycznymi, wykonanymi najczęściej z twardego preszpanu. Liczba cewek w uzwojeniu zależy od warunków cieplnych, napięciowych oraz czasem od warunków wytrzymałości mechanicznej. W zależności od konstrukcji oraz wymaganych parametrów, uzwojenia cewkowe są nawijane jednym lub kilkoma przewodami równoległymi o przekroju prostokątnym bądź przewodami o ciągłej transpozycji żył [105,182].

Obecnie stosowane uzwojenia transformatorów wysokich napięć posiadają najczęściej cewki: wywrotkowe, przeplatane lub z dodatkowymi zwojami ekranującymi. Każde z tych typów uzwojenia cewkowego posiada swoje odmiany, w których połączenia między cewkami wykonane są w inny sposób. Sposób połączenia cewek wewnętrznych uzwojenia jest bardzo istotny nie tylko z produkcyjnego punktu widzenia (wpływa na pracochłonność), ale także ze względów eksploatacyjnych, ponieważ w bezpośredni sposób wpływa na wartość napięcia między cewkami w trakcie normalnej pracy, a co za tym idzie, decyduje o konstrukcji układu izolacyjnego. Sposób wykonania połączeń międzycewkowych, a także sposób prowadzenia zwojów przewodu nawojowego względem siebie, decydują o początkowym rozkładzie napięcia w uzwojeniu podczas oddziaływaniu przebiegów szybkozmiennych (np. przy próbie napięciowej transformatora znormalizowanym udarem napięciowym piorunowym 1,2/50  $\mu$ s) [78,105,182].

Ze względu na swoją budowę, uzwojenia cewkowe cechują się dużą pracochłonnością, ponieważ wymagają wykonywania wielu operacji ręcznie (odwracanie cewek, przeplatanie zwojów, wplatanie zwojów ekranujących, zakładanie przekładek preszpanowych, elementów kierujących przepływ oleju, itp.), co znacząco wydłuża czas nawijania oraz zwiększa koszty produkcji. Pomimo tego, uzwojenia cewkowe są powszechnie stosowane w praktyce, ponieważ w stosunkowo łatwy sposób można w nich zapewnić spełnienie wymagań mechanicznych, elektrycznych oraz cieplnych [13,110,182].

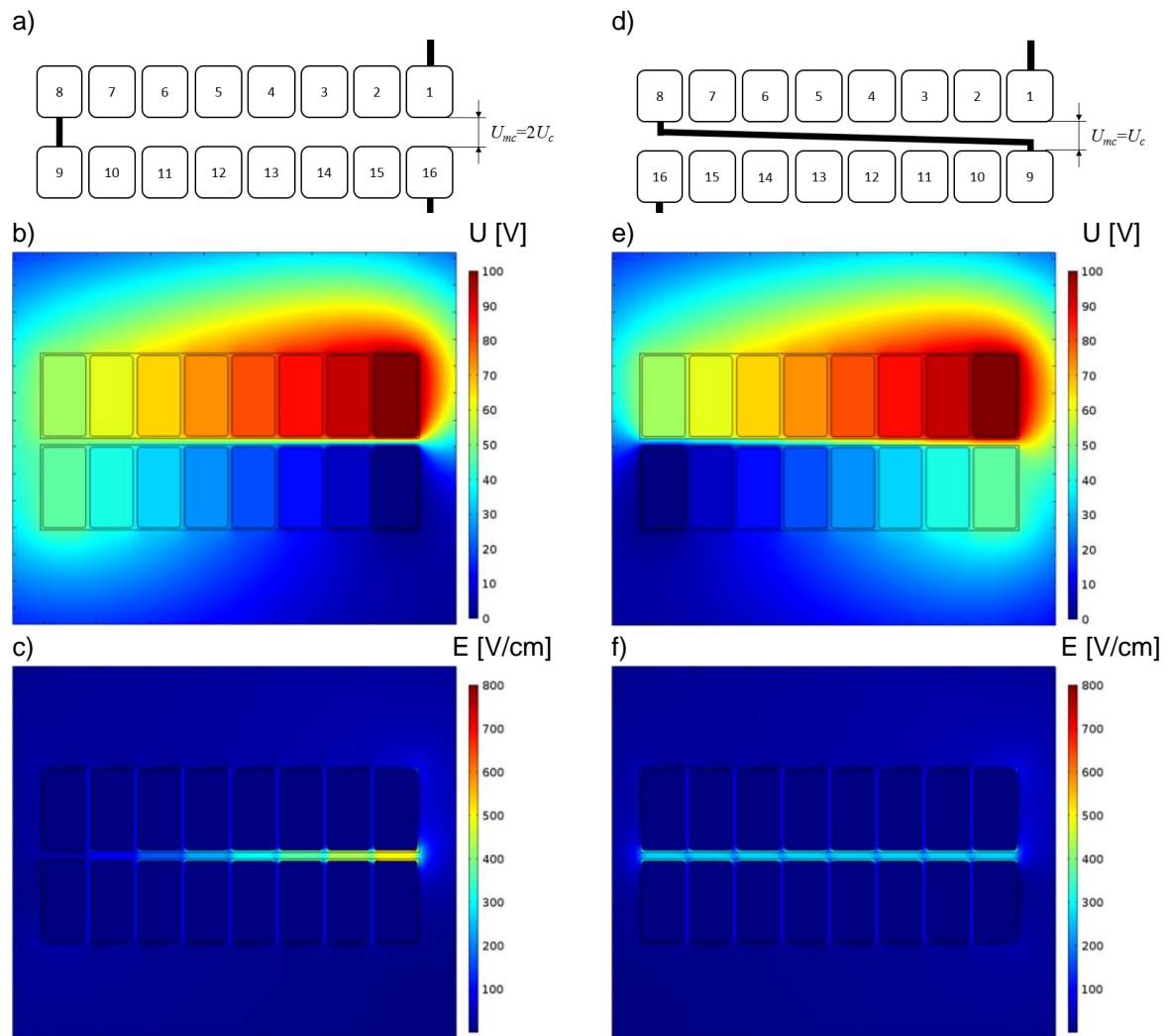
Dokładniejszą charakterystykę poszczególnych topologii uzwojeń cewkowych przedstawiono w dalszej części rozdziału.

### 4.1.1 Cewki podwójne i wywrotkowe

Jedną z typowych cewek nawijanych drutem profilowanym prostokątnym jest tzw. cewka podwójna, zwana też dwucewką. Sposób jej wykonania dla  $n=8$  zwojów w cewce jest przedstawiony schematycznie na Rys. 4.4a. Uzwojenie składa się ze stosu cewek podwójnych,



połączonych szeregowo ze sobą. Podstawową wadą tego rozwiązania jest konieczność łączenia (zgrzewanie za pomocą fosforobrazu, lutowanie srebrem lub spawanie propanem przy dopływie tlenu) ze sobą poszczególnych cewek podwójnych, co znacząco komplikuje proces wytwarzania uzwojenia i musi być przeprowadzone przez wysoko wykwalifikowany personel, w celu zapewnienia odpowiedniej jakości połączeń oraz izolacji w miejscu łączenia. W takim uzwojeniu napięcie  $U_{mc}$  między sąsiednimi cewkami jest równe napięciu  $U_c$  dwóch cewek (Rys. 4.4a). Rozkład potencjału elektrycznego w obrębie pojedynczej dwucewki i odpowiadający mu rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawiono odpowiednio na Rys. 4.4b oraz Rys. 4.4c. Obliczenia wykonano przy założeniu liniowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia, dla napięcia zasilającego  $U=100\text{ V}$  (to wartość napięcia przyjęta na potrzeby symulacji).



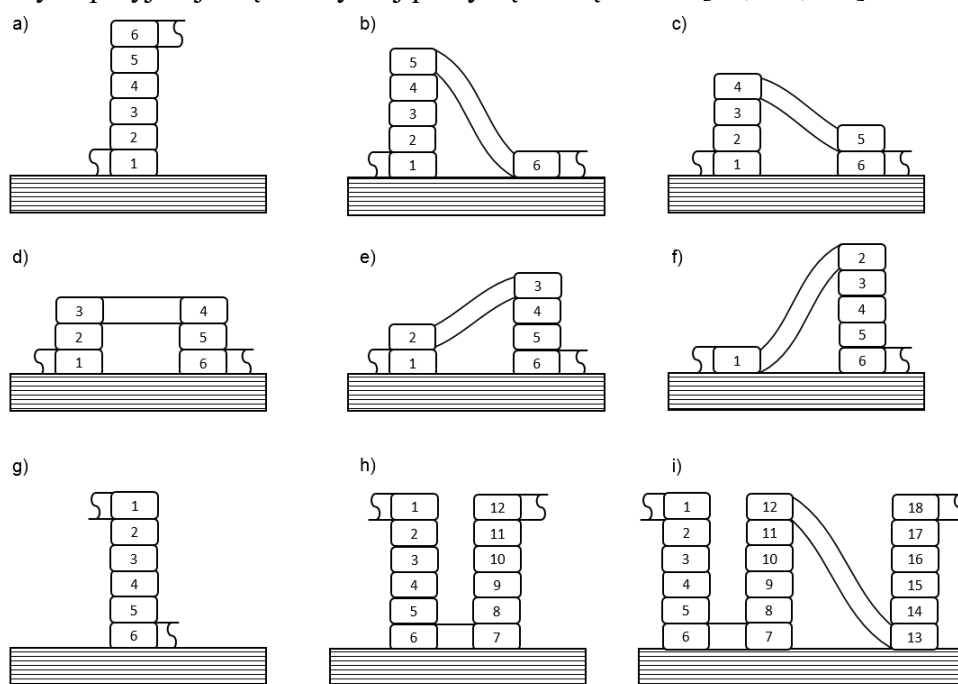
Rys. 4.4 Sposoby łączenia cewek uzwojenia: a) cewka odwrócona i odpowiadający jej rozkład potencjału (b) oraz natężenia pola elektrycznego (c); d) cewka nieodwrócona i odpowiadający jej rozkład potencjału (e) oraz natężenia pola elektrycznego (f)

Spotyka się również inny sposób łączenia ze sobą sąsiednich cewek, przedstawiony na Rys. 4.4d, w którym połączenia przechodzą pomiędzy dyskami. Wykonywanie takich połączeń międzycewkowych komplikuje i wydłuża proces produkcji uzwojenia, jednakże w tym przypadku napięcie  $U_{mc}$  pomiędzy cewkami jest dwukrotnie mniejsze niż w klasycznej cewce podwójnej (Rys. 4.4a). Rozkład potencjału elektrycznego i odpowiadający mu rozkład

natężenia pola elektrycznego dla takiej dwucewki o  $n=8$  zwojów w cewce, dla analogicznych założeń jak poprzednio, przedstawiono na Rys. 4.4e i Rys. 4.4f.

Przedstawione na Rys. 4.4c i Rys. 4.4f rozkłady natężenia pola elektrycznego pomiędzy sąsiednimi cewkami o naprzemiennym (do wewnątrz, na zewnątrz) oraz zgodnym (do wewnątrz) kierunku nawijania zwojów różnią się znacząco. W dalszej części rozdziału, cewki o naprzemiennym kierunku nawijania nazywane będą cewkami odwróconymi, a o kierunku zgodnym – cewkami nieodwróconymi. W przypadku cewki nieodwróconej, przy założeniu równomiernego rozkładu napięcia wzdłuż cewki, izolacja międzycewkowa jest naprężana równomiernie (Rys. 4.4f). W cewce odwróconej najbardziej naprężana jest izolacja pomiędzy skrajnymi zewnętrznymi zwojami, w miejscu o największej różnicy potencjałów oraz największej nierównomierności rozkładu natężenia pola elektrycznego (Rys. 4.4c). Wiąże się to z koniecznością zapewnienia izolacji o odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej w tym obszarze uzwojenia.

Obecnie w większości przypadków, w transformatorach mocy stosowane są jednak tzw. cewki wywrotkowe, ponieważ są one nawijane w sposób ciągły i dzięki temu, nie wymagają żadnych połączeń lutowanych. Cechują się one specyficznym procesem produkcyjnym ze względu na konieczność „wywrócenia” co drugiej cewki w uzwojeniu. „Wywracanie” cewki polega na odwróceniu kolejności zwojów w uprzednio nawiniętej cewce. Operacja ta zwiększa prędkość budowy uzwojenia, ale umożliwia wykonanie prostych przejść między cewkami, z zachowaniem ciągłości przewodu nawojowego. Zasada wywracania cewek została pokazana graficznie na Rys. 4.5. Wykonanie uzwojenia rozpoczyna się od nawinięcia pierwszej cewki (a). Następny etap polega na rozluźnieniu zwojów i ich przełożeniu w odwrotnej kolejności (b-g). Następnie nawija się kolejną cewkę w sposób normalny – bez odwracania zwojów (h). W analogiczny sposób są wykonywane kolejne cewki (i). Takie uzwojenia można nawijać jednym lub wieloma przewodami równoległymi. Przy projektowaniu uzwojeń wywrotkowych przyjmuje się zazwyczaj parzystą liczbę cewek [13,110,182].



Rys. 4.5 Sposób wykonania uzwojenia wywrotkowego

## 4.1.2 Uzwojenia przeplatane

W transformatorach wysokich napięć występuje problem dotyczący izolacji zwojowej początkowych cewek uzwojenia, która jest narażona na oddziaływanie znacznie większych napięć elektrycznych w trakcie oddziaływania napięć udarowych piorunowych i z tego powodu jest znacznie grubsza niż izolacja cewek normalnych, znajdujących się w głębi uzwojenia. Wynika to z niekorzystnego początkowego rozkładu napięcia udarowego w uzwojeniu. Linearyzacja tego rozkładu przez zwiększenie pojemności wzdłużnej uzwojenia (międzyzwojowej i międzycewkowej), szczególnie w jego początkowej części, pozwala znacząco zmniejszyć narażenia przepięciowe izolacji wstępnych cewek uzwojenia [78,84,95,96,137,171,182].

Jednym ze sposobów pozwalających na poprawienie rozkładu napięcia udarowego w uzwojeniu jest zastosowanie tzw. dwucewek splatanych (przeplatanych), które nawijane są dwoma przewodami równoległymi w sposób przedstawiony na Rys. 4.6. Główną zaletą przeplatania zwojów w obrębie cewki jest konstrukcyjne zwiększenie pojemności wzdłużnej uzwojenia poprzez geometryczne zbliżenie do siebie zwojów, które elektrycznie są od siebie znacznie oddalone. Ma to bezpośredni wpływ na kształt początkowego rozkładu napięcia i wpływa korzystnie na ograniczenie przepięć udarowych w uzwojeniu [13,60,78,95,136,171].

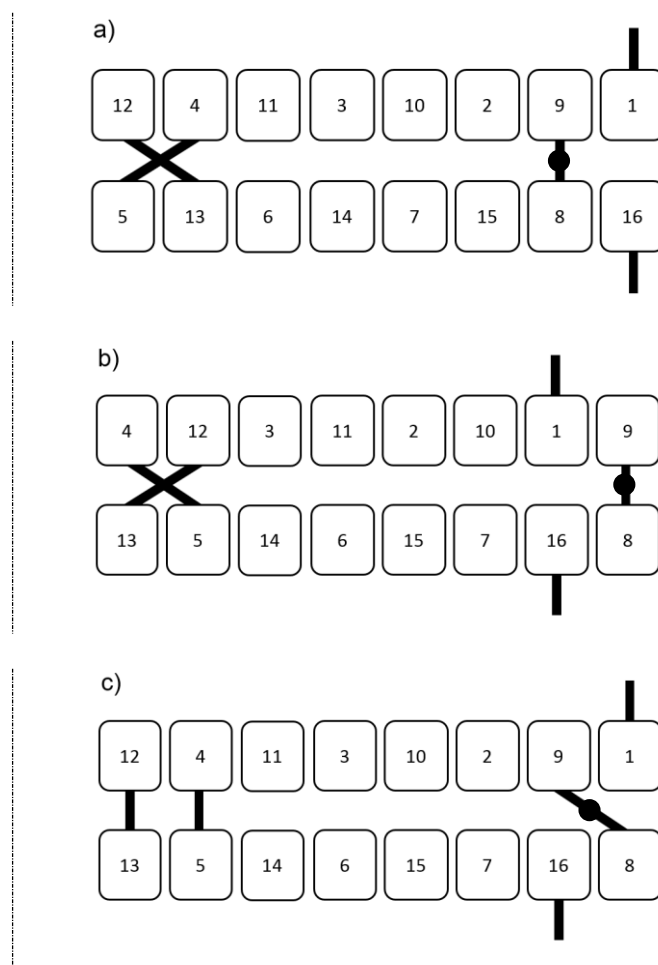
Pojemność szeregową (wzdłużną) uzwojenia splatanego może być nawet kilkadziesiąt razy większa niż klasycznego uzwojenia wywrotkowego [137,171]. W przypadku uzwojeń wykonanych z cewek podwójnych bądź wywrotkowych, pojemność wzdłużna uzwojenia jest reprezentowana głównie przez kanały międzycewkowe, a pojemności międzyzwojowe stanowią jedynie niewielką część całkowitej pojemności szeregowej takiego uzwojenia. Zastosowanie przeplotów sprawia, że pojemność szeregową uzwojenia jest reprezentowana głównie przez przestrzenie międzyzwojowe, w których odległości izolacyjne są znacznie mniejsze i można w nich zgromadzić znacznie większą energię pola elektrycznego [95].

Typowe uzwojenia z dwucewkami przeplatanyimi występują w podstawowych trzech wykonaniach nazwanych od nazwisk ich wynalazców (Rys. 4.6):

- cewki z przepleceniami Chadwicka-Stearna,
- cewki z przepleceniami Kratochwila,
- cewki z przepleceniami van Nuysa (zwane też cewkami hybrydowymi).

Uzwojenia z cewkami przeplatanyimi według topologii Chadwicka-Stearna opisanej w pracach [45] i [208] nawijane są wywrotkowo dwoma przewodami równoległymi (Rys. 4.6a). Skrzyżowanie wewnętrznych zwojów (4-5, 12-13) otrzymuje się bez przecinania przewodów, natomiast powrót z cewki drugiej do pierwszej (zwoje 8-9) następuje po odcięciu zewnętrznego przewodu i połączeniu go z wolnym początkiem cewki pierwszej. W ten sposób można nawinąć dowolną parzystą liczbę przeplatanych cewek. Uzwojenia tego typu mają znacznie większą pojemność wzdłużną w porównaniu do uzwojeń wywrotkowych, ponieważ sąsiadujące ze sobą zwoje są oddalone od siebie o  $n$  (przy nieparzystej ilości zwojów w cewce) lub o  $n+1$  (przy parzystej liczbie zwojów w cewce), gdzie  $n$  to liczba zwojów w cewce.

W przypadku konieczności nawinięcia uzwojenia przeplatane go kilkoma przewodami równoległymi, wykonuje się je w analogiczny sposób [136,182].



Rys. 4.6 Uzwojenia cewkowe z przeplotami typu: a) Chadwick-Stearna, b) Kratochwila, c) van Nuysa

Odmianą dwucewki Chadwick-Stearna jest cewka z przepleceniami Kratochwila przedstawiona na Rys. 4.6b [117]. Według tego sposobu, powrót z cewki drugiej do pierwszej następuje na skrajnych zewnętrznych zwojach (8-9) cewki. Skrzyżowanie zwojów wewnętrznych jest natomiast wykonane w analogiczny sposób jak w cewce Chadwick-Stearna. Cewka spleciona wg sposobu Kratochwila jest prostsza wykonawczo, ponieważ połączenie cewek następuje na skrajnych zewnętrznych zwojach cewki, do których jest łatwiejszy dostęp [136].

Van Nuys zaproponował odmienne rozwiązanie [228], w którym przejścia z cewki pierwszej do drugiej następują bez krzyżowania zwojów, jak pokazano na Rys. 4.6c. Jest to dwucewka nazywana czasem hybrydową, ponieważ zwoje w górnej cewce ułożone są tak samo jak w górnej cewce Chadwick-Stearna, a w dolnej tak jak w dolnej cewce Kratochwila.

Należy zwrócić uwagę, że we wszystkich uzwojeniach przeplatanych występują o wiele większe niż w zwykłych uzwojeniach napięcia międzyzwojowe, zarówno podczas normalnej pracy jak i podczas prób napięciem probierczym. Wiąże się to często z koniecznością zastosowania grubszej izolacji zwojowej [105,110,182].

Na pojemność wzdłużną uzwojenia cewkowego składają się pojemności międzyzwojowe  $C_{mz}$  oraz pojemności międzycewkowe  $C_{mc}$ . Wypadkowa pojemność  $C_{tot}$  dwóch sąsiadujących cewek jest sumą dwóch składników, reprezentujących energie zgromadzone w przestrzeni międzyzwojowej i międzycewkowej, co można wyrazić jako (4.1):

$$C_{tot} = C_{mz} + C_{mc} \quad (4.1)$$

gdzie: -  $C_{mz}$  – pojemność zastępcza reprezentująca energię zgromadzoną w izolacji międzyzwojowej,  
 -  $C_{mc}$  - pojemność zastępcza reprezentująca energię zgromadzoną w izolacji międzycewkowej.

Pojemność wzdłużną cewek wywrotkowych oraz splatanych wg sposobu Chadwicka-Stearna można obliczyć korzystając z zależności (4.2) i (4.3), przy czym pierwszy składnik reprezentuje energię pola elektrycznego zgromadzoną w kanale pomiędzy cewkami, a drugi energię zgromadzoną w przestrzeni międzyzwojowej, zgodnie z (4.1) [137]:

- cewka wywrotkowa:

$$C_{wyw} = \frac{4}{3} \cdot C_{zz} \cdot n + C_{zw} \cdot \left(\frac{n-1}{n^2}\right) \quad (4.2)$$

- cewka z przeplotami Chadwicka-Stearna (dla parzystej liczby zwojów w cewce):

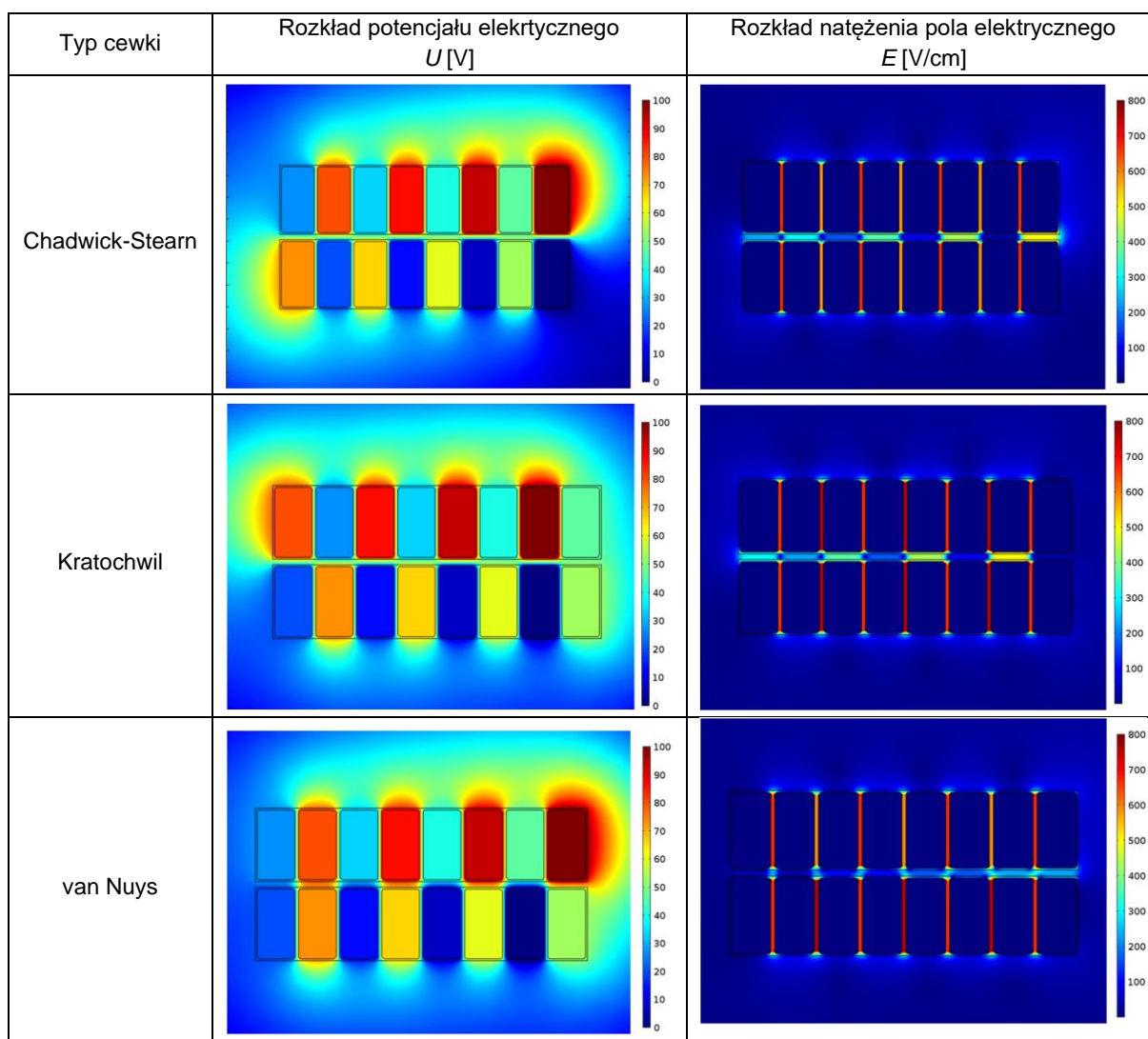
$$C_{ch-s} = \frac{7}{3} \cdot C_{zz} \cdot n + C_{zw} \cdot \left[\frac{n}{2} + \left(\frac{n}{2} - 1\right) \cdot \left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right] \quad (4.3)$$

gdzie: -  $C_{zz}$  – pojemność pomiędzy sąsiadującymi zwojami przez kanał,  
 -  $C_{zw}$  – pojemność pomiędzy sąsiadującymi (przylegającymi) zwojami w cewce,  
 -  $n$  – liczba zwojów w cewce.

Zależności pozwalające na wyznaczenie pojemności zastępczej dwucewek o pozostałych schematach splecenia, dla parzystej i nieparzystej liczby zwojów w cewkach zostały przedstawione np. w literaturze [95]. Należy zwrócić uwagę, że te zależności są wynikiem przyjęcia pewnych założeń upraszczających i różni autorzy (np. w [157]) prezentują odmienne równania do obliczania pojemności zastępczej, ze względu na przyjęcie innych uproszczeń i założeń.

Rozkłady potencjału elektrycznego w poszczególnych odmianach uzwojeń z cewkami splatanymi oraz odpowiadające im rozkłady natężenia pola elektrycznego przedstawiono w Tabeli 4.1. We wszystkich analizowanych przypadkach założono, że odległości pomiędzy sąsiadującymi cewkami oraz pomiędzy kolejnymi zwojami w cewce są jednakowe. Obliczenia wykonano przy założeniu liniowego (równomiernego) rozkładu napięcia w cewkach, zgodnie z kolejnością nawinięcia zwojów, przedstawioną na Rys. 4.6, dla napięcia zasilającego  $U=100$  V (wartość przyjęta na potrzeby symulacji).

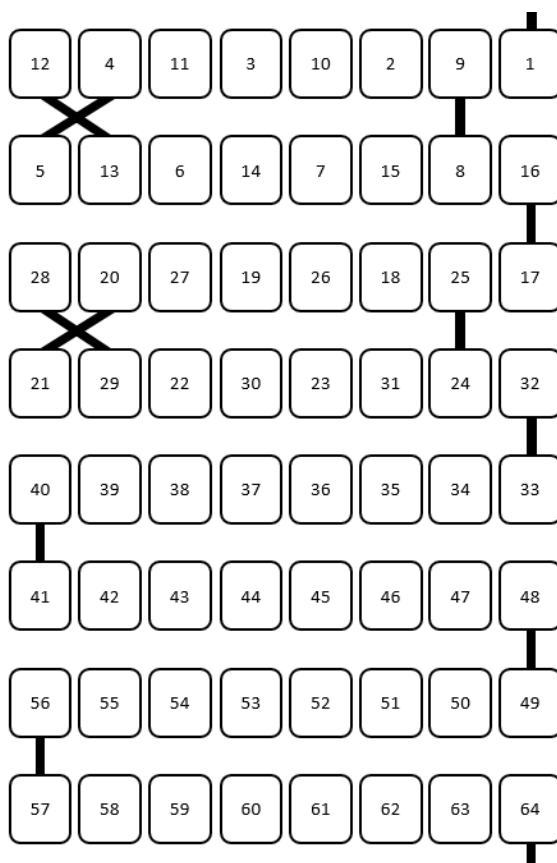
Tabela 4.1 Rozkłady potencjału i natężenia pola elektrycznego w dwucewkach splatanych



Analizując rozkłady natężenia pola elektrycznego w obrębie dwucewek o różnych sposobach przeplatania zwojów, można zauważyć pewne charakterystyczne różnice (Tabela 4.1). W cewce splatanej według rozwiązania Chadwicka-Stearna, napięcia międzyzwojowe są nieznacznie mniejsze niż w przypadku splecenia Kratochwila, co wynika z mniejszej „elektrycznej” odległości zwojów w cewce. W analizowanych przypadkach, w rozwiązaniu cewki hybrydowej van Nuysa naprężenia elektryczne w górnej cewce są takie same, jak w sposobie Chadwicka-Stearna, natomiast w dolnej takie same, jak w metodzie Kratochwila. Główne różnice są widoczne w naprężeniach między cewkami uzwojenia. Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego w kanałach pomiędzy cewkami Chadwicka-Stearna i Kratochwila występują na innych pozycjach w obrębie dwucewki, ale ich wartości są jednakowe, natomiast w rozwiązaniu van Nuysa naprężenia są około dwukrotnie mniejsze. Można zatem wnioskować, że z punktu widzenia naprężeń elektrycznych i względów izolacyjnych, najkorzystniejsze są splecenia zgodne z metodą van Nuysa. Pozwalają one dodatkowo na zmniejszenie odległości pomiędzy cewkami, a w efekcie ograniczenie wysokości uzwojenia, co następnie wpływa na mniejsze zużycie materiałów. Niemniej jednak, w praktyce należy również wziąć pod uwagę kwestie wykonawcze (pracochłonność) oraz względy

cieplne – zmniejszenie przestrzeni między cewkami może być niemożliwe ze względu na pogorszenie warunków chłodzenia. Z tego względu, wybór sposobu przeplatania zwojów w cewkach powinien być rozpatrywany indywidualnie dla każdego transformatora, z uwzględnieniem kwestii elektrycznych, cieplnych oraz mechanicznych.

W zależności od poziomu napięcia oraz zagrożenia przepięciowego, przeplecenia mogą obejmować całe uzwojenie (transformatory na napięcia 220 kV, 400 kV i wyższe) lub tylko jego początkową część, w której zagrożenie przepięciami jest największe [182]. Dla przykładu, w transformatorach energetycznych średniej mocy (16 – 63 MVA) o napięciu strony górnej na poziomie 110 kV, w przypadku uzwojenia o ok. 60 cewkach, przeplecenia obejmowały początkowo 20 cewek wstępnych, reszta była wykonywana jako klasyczne uzwojenie wywrotkowe, bez krzyżowania zwojów. Następnie, przeprowadzone na szeroką skalę badania i analizy pozwoliły znacząco zmniejszyć wymaganą ilość cewek splatanych (nawet do 12 cewek) z zachowaniem zadawalających zapasów wytrzymałości izolacji [133]. Przykład topologii uzwojenia częściowo splatanego o przeplotach Chadwicka-Stearna przedstawiono na Rys. 4.7.

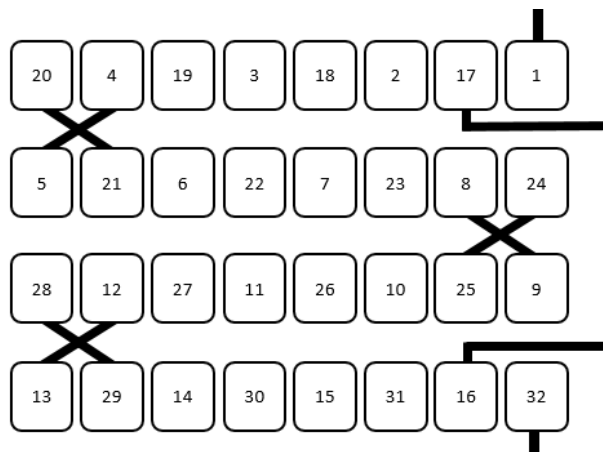


Rys. 4.7 Przykład uzwojenia częściowo splatanego z przeplotami Chadwicka-Stearna

Rozkład początkowy napięcia w uzwojeniach z niepełnymi przepleceniami należy dokładnie obliczać, aby nie występowały ostre załamania krzywej rozkładu napięcia w miejscu przejścia z części przeplatanej do nieprzeplatanej. Takim załamanom towarzyszą duże przepięcia międzycewkowe [105].

Pojemność wzdluzna cewki wchodzącej w skład dwucewki splatanej jest proporcjonalna do  $(n-1)$ , gdzie  $n$  to ilość zwojów w cewce, dlatego też, przy niewielkiej liczbie

zwojów  $n$ , efektywność splatania w ograniczaniu przepięć na izolacji wzdłużnej jest nieduża. Rozwiązaniem problemu dużych przepięć na izolacji wzdłużnej może być w takim przypadku zastosowanie tzw. czterocewek splatanych szczegółowo opisanych przez A. Maliszewskiego w pracy [136]. Czterocewki splatane są rozwinięciem koncepcji dwucewek splatanych, z tą różnicą, że przeplecenia obejmują nie dwie, ale cztery kolejne cewki. Splacenia w czterocewkach mogą być wykonywane wg koncepcji Chadwicka-Stearna, Kratochwila, van Nuysa, bądź ich dowolnej kombinacji. W efekcie daje to wiele możliwych sposobów połączeń, umożliwiających odpowiednie ograniczenie napięć międzyzwojowych oraz międzycewkowych. Przykładowy schemat rozmieszczenia zwojów w czterocewce o liczbie zwojów w cewce  $n=8$ , z przepleceniami Chadwicka-Stearna przedstawiono na Rys. 4.8.



Rys. 4.8 Czterocewka o  $n=8$  zwojach w cewce z przeplotami typu Chadwicka-Stearna

Pojemność wzdłużna czterocewek splatanych jest czterokrotnie większa w stosunku do dwucewek splatanych, dzięki czemu skutecznie ograniczają one przepięcia na izolacji wzdłużnej nawet przy niewielkiej liczbie zwojów w cewce. Istotne jest natomiast, że w przypadku zastosowania czterocewek, dwukrotnie wzrasta okres oscylacji wewnętrznych w porównaniu do dwucewek o tej samej liczbie zwojów w cewce. Przepięcia między czterocewkami mogą być ograniczone przez dobór odpowiedniego schematu przepleceń [136], np. stosując różne topologie splatania zwojów w obrębie jednego uzwojenia.

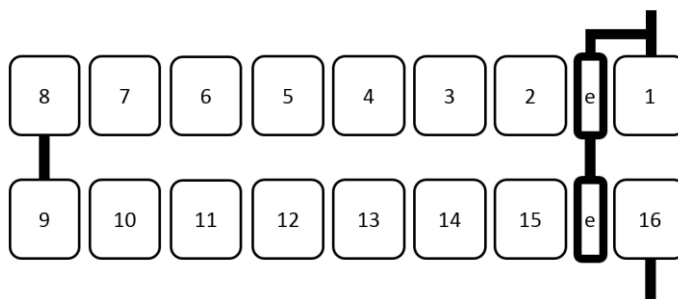
### 4.1.3 Uzwojenia z wplatanymi zwojami ekranującymi

W uzwojeniach górnego napięcia transformatorów energetycznych dużej mocy występują prądy, wymuszające zastosowanie kilku, lub nawet kilkunastu przewodów równoległych. Lepszym rozwiązaniem w takiej sytuacji jest jednak zastosowanie przewodów o ciągłej transpozycji żył (CTŻ). Niestety w tym przypadku, praktycznie niemożliwe jest wykonanie przepleceń, ponieważ wymagałoby to cięcia i łączenia ze sobą przewodów wielożyłowych [182].

W takiej sytuacji, w celu poprawienia początkowego rozkładu napięcia w uzwojeniu, stosuje się cewki z wplatanymi zwojami ekranującymi, jak przedstawiono na Rys. 4.9. Potencjał takich zwojów jest wymuszony przez ich bezpośrednie połączenie z zaciskiem liniowym lub wybranymi punktami uzwojenia albo wynika ze sprzężenia pojemnościowego



tych zwojów z uzwojeniem. Izolacja dodatkowych zwojów ekranujących musi być odpowiednio dobrana, ze względu na duże różnice napięć pomiędzy sąsiadującymi zwojami normalnymi i ekranującymi, szczególnie w przypadku, gdy pojedyncze zwoje ekranujące obejmują kilka kolejnych cewek uzwojenia [23,24,95,156,182].



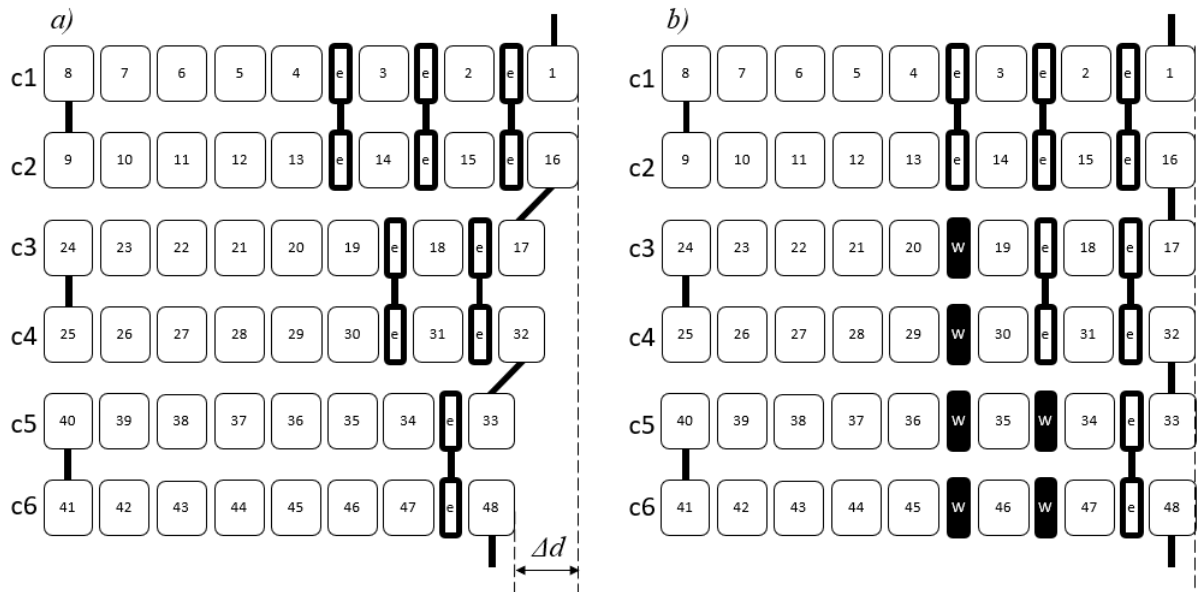
Rys. 4.9 Uzwojenie z wplecionymi zwojami ekranującymi (*e*)

Koncepcja stosowania zwojów ekranujących jest znana od dawna. W pierwotnych wykonaniach, były one umieszczane w cewkach jedynie od strony zewnętrznej, przez co ekranowały one uzwojenie od wpływu zewnętrznych pojemności poprzecznych (do kadzi i do sąsiednich uzwojeń). Wadami tego rozwiązania było jednak przekazywanie napięcia piorunowego do dalszych części uzwojenia oraz tylko jednostronne sprzężenie pojemnościowe zwojów ekranujących i normalnych. W miarę postępowania zwojów ekranujących w dół cewki, zwiększało się napięcie pomiędzy nimi, a zwojami roboczymi, co wiązało się z koniecznością wzmacniania izolacji w tych fragmentach uzwojenia. Istotny problem stanowiło też wykonanie izolacji zakończenia zwojów ekranujących [105,136,182]. „Ślepy” koniec zwoju ekranującego musiał być wyposażony w odpowiednią końcówkę, ograniczającą wpływ efektu brzegowego (ostrzych krawędzi), powodującego lokalny wzrost natężenia pola elektrycznego na końcu zwoju. Taka końcówka była wykonywana np. z preszpanu pokrytego warstwą słaboprzewodzącego lakieru [95].

Wplecenie zwojów ekranujących pomiędzy zwoje robocze cewki (zamiast umieszczania ich na zewnątrz uzwojenia) znacznie poprawiło ich efektywność – pojemność wzrosła dwukrotnie, ponieważ obie strony zwoju ekranującego sąsiadują ze zwojami normalnymi. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu *m*-zwojów wplatanych w cewce, sprzężenie pojemnościowe zostało *m*-krotnie zwiększone. Warto również zaznaczyć, że efektywność wplatania zwojów ekranujących w niewielkim stopniu zależy od liczby zwojów normalnych w cewce, natomiast znacząco wzrasta wraz ze zwiększeniem liczby samych zwojów ekranujących [95].

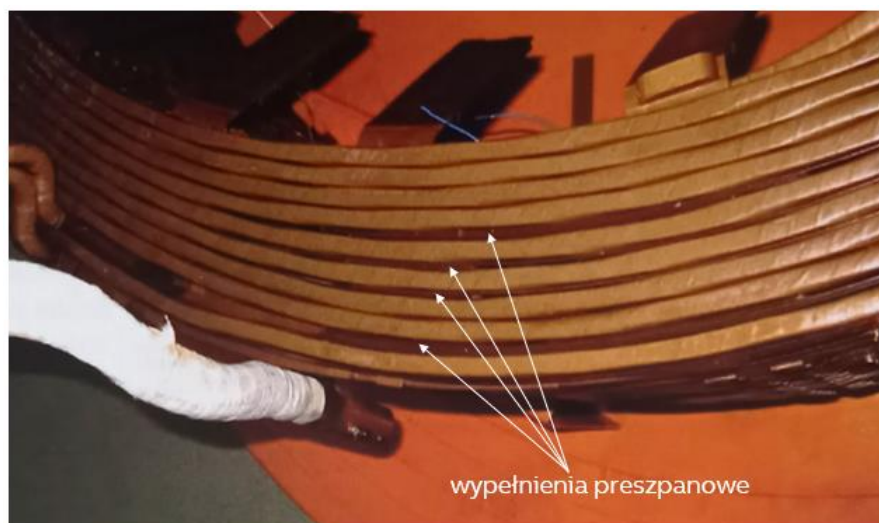
Kolejną, bardzo istotną sprawą jest fakt, że zastosowanie ekranujących zwojów wplatanych, zmienia promieniowe wymiary cewki, co wiąże się z koniecznością stosowania wypełnień preszpanowych pomiędzy przewodami w kolejnych cewkach (w których zwoje ekranujące nie są wplecione), w celu zachowania stałej średnicy uzwojenia. Graficznie przedstawiono to na przykładzie schematu połączenia pierwszych sześciu cewek uzwojenia (*c1* do *c6*) z wplecionymi zwojami ekranującymi *e*, znajdującego się na Rys. 4.10. W przedstawionym na Rys. 4.10a schemacie o *n*=8 zwojów w cewce nie uwzględniono preszpanowych wypełnień w cewkach o numerach *c3* do *c6*, przez co wyraźnie widać wpływ stosowania zwojów ekranujących na zmianę średnicy poszczególnych cewek i konieczność

zastosowania odpowiednich wypełnień. Promień uzwojenia pomiędzy cewkami *c1* oraz *c6* zmienia się o wartość  $\Delta d$ , dlatego w celu zachowania stałej średnicy uzwojenia wzdłuż całej jego wysokości, należy zastosować preszpanowe zwoje wypełniające *w*, jak przedstawiono na Rys. 4.10b. Takie wypełnienia mogą prowadzić do osłabienia sprzężenia pojemnościowego między zwojami ze względu na zwiększenie odległości pomiędzy nimi, a w rezultacie do zmniejszenia pojemności wzdłużnej cewki. Z tego też względu, o ile to możliwe, wypełnienia powinny stosować się pomiędzy przewodami równoległymi, które nie biorą udziału w zwiększaniu pojemności szeregowej uzwojenia – zwoje równoległe znajdują się na jednakowym potencjale [136].



Rys. 4.10 Przykładowe schematy uzwojenia z wplecionymi zwojami ekranującymi (*e*) w początkowych sześciu cewkach (*c1-c6*): a) bez wypełnień preszpanowych, b) z wypełnieniami preszpanowymi (*w*)

Na Rys. 4.11 przedstawiono przykładowe zdjęcie rzeczywistego uzwojenia cewkowego z wplecionymi wypełnieniami preszpanowymi w cewce.



Rys. 4.11 Zastosowanie wypełnień preszpanowych pomiędzy zwojami w cewce [132]

Pojemność wzdłużną  $C_e$  cewki z wplatanymi zwojami ekranującymi dla schematu przedstawionego na Rys. 4.12, można obliczyć z uproszczonej zależności (4.4) – dla jednego zwoju ekranującego oraz (4.5) – dla dwóch zwojów ekranujących w cewce [23,24].

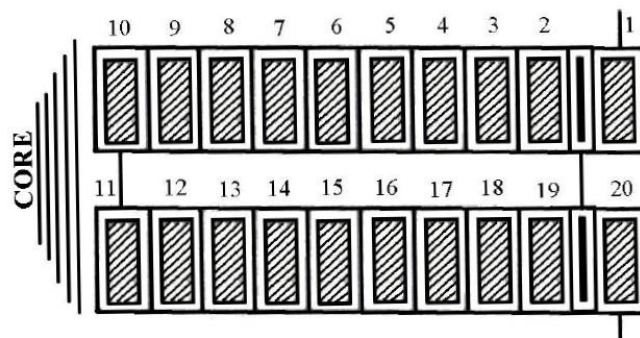
$$C_e = \frac{n}{6} \cdot C_d + \left( \frac{n^2 - n - 2}{n^2} \right) \cdot C_t \quad - \text{ dla jednego zwoju ekranującego} \quad (4.4)$$

$$C_e = \frac{n}{6} \cdot C_d + \left( \frac{2n^2 - 8n + 6}{n^2} \right) \cdot C_t \quad - \text{ dla dwóch zwojów ekranujących} \quad (4.5)$$

gdzie: -  $C_d$  – pojemność wzdłużna pomiędzy sąsiadującymi zwojami przez kanał,

-  $C_t$  – pojemność pomiędzy sąsiadującymi zwojami w cewce,

-  $n$  – liczba zwojów w cewce.



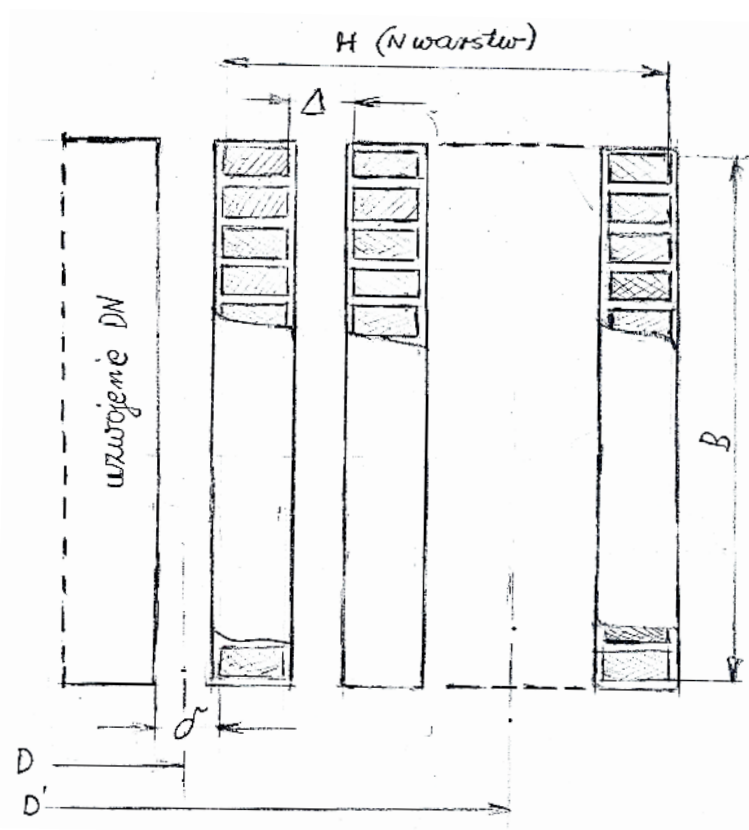
Rys. 4.12 Schemat połączeń cewek uzwojenia z jednym zwojem ekranującym w cewce [23]

Dokładniejsze zależności opisujące pojemności wzdłużne uzwojeń z wplatanymi zwojami ekranującymi, uwzględniające liczbę cewek objętych wplataniami, liczbę zwojów ekranujących oraz roboczych w cewce, można znaleźć w pracy [137] i cytowanej w niej literaturze.

## 4.2 Uzwojenia warstwowe wysokiego napięcia

Uzwojenia warstwowe transformatorów składają się z jednej lub z kilku warstw przewodu nawiniętego na kolumnie rdzenia, wzdłuż jego wysokości (Rys. 4.13). Zazwyczaj nawijane są one na całą czynną wysokość kolumny, pomniejszoną o wymagane odległości izolacyjne do jarzm (górnego i dolnego). Zwoje są ułożone osiowo, jeden obok drugiego, bez żadnego odstępu chłodzącego. W grupie uzwojeń warstwowych wyróżnia się uzwojenia rurowe i śrubowe. Takie uzwojenia znajdują zastosowanie przeważnie w transformatorach energetycznych małych i średnich mocy. W dużych transformatorach energetycznych wysokich napięć, uzwojenia warstwowe są stosowane powszechnie jedynie jako cewki regulacyjne. W Polsce, takie konstrukcje stosuje się głównie w transformatorach rozdzielczych do poziomu napięcia 30 kV [13,110]. Bardzo rzadko stosuje się te rozwiązania jako podstawowe uzwojenia w transformatorach wysokich napięć, przez co są znacznie rzadziej i słabiej opisane w literaturze. Niemniej jednak, w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia transformatory wysokiego napięcia z uzwojeniami warstwowymi były z powodzeniem

stosowane w eksploatacji, np. [20,126,127,128,163,241]. W późniejszych latach uzwojenia te, pomimo prostszego procesu produkcji, zostały zastąpione uzwojeniami typu cewkowego, ze względu na łatwiejsze spełnienie w nich wymagań elektrycznych, mechanicznych i cieplnych jednocześnie.



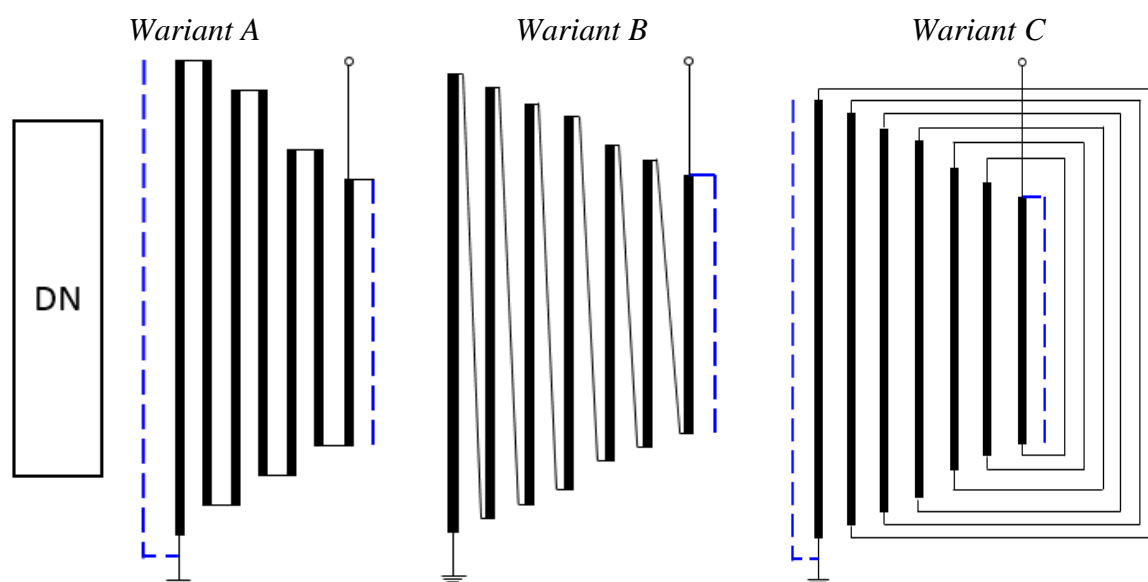
Rys. 4.13 Przykładowy szkic uzwojenia wielowarstwowego z zaznaczonymi podstawowymi wymiarami [110]

Uzwojenia wielowarstwowe wysokiego napięcia można wykonywać pojedynczym przewodem lub kilkoma przewodami równoległymi o przekroju prostokątnym, ale do ich nawijania dobrze nadają się również przewody CTŻ. Pod względem wytrzymałości na działanie sił zwarciovych, a szczególnie składowej osiowej, lepsze są uzwojenia cewkowe, ponieważ posiadają większe powierzchnie oporowe [105]. Uzwojenia warstwowe wyposażone w ekrany elektryczne są natomiast korzystniejsze z punktu widzenia wytrzymałości napięciowej udarowej, ponieważ charakteryzują się korzystniejszym początkowym rozkładem napięcia, bez konieczności stosowania pracochlönnych zabiegów w postaci przeplatania zwojów, czy wplatania dodatkowych zwojów ekranujących [110].

Uzwojenia warstwowe transformatorów wysokonapięciowych, stosowane dotychczas w eksploatacji i znane z literatury, posiadają z reguły uziemiony punkt gwiazdowy. Taka właśnie koncepcja została przyjęta w dalszych rozważaniach dotyczących uzwojeń wielowarstwowych. Zazwyczaj stosuje się uziemienie od strony warstwy wewnętrznej, dzięki czemu szczelinę izolacyjną pomiędzy uzwojeniem dolnego i górnego napięcia można zwymiarować do napięcia probierczego strony dolnej. Umożliwia to nawinięcie uzwojenia górnego napięcia na tulei o mniejszej średnicy, przez co można ograniczyć zużycie materiałów

oraz otrzymać bez większych problemów napięcie zwarcia transformatora na poziomie około 12-15% [110]. Dzięki uziemieniu początku warstwy wewnętrznej można zmniejszyć również jej odległość od jarzm. Odległość kolejnych warstw od jarzm wzrasta wraz z oddalaniem się od punktu gwiazdowego w kierunku promieniowym na zewnątrz uzwojenia. Trzy warianty takiego uzwojenia pokazano schematycznie na Rys. 4.14. Uzwojenia tego typu, zazwyczaj posiadają od strony warstwy zewnętrznej, ekran elektrostatyczny podłączony do zacisku liniowego. Jego rola to zwiększenie pojemności wzdłużnej uzwojenia (co przyczynia się do poprawy równomierności początkowego rozkładu napięcia udarowego). Niekiedy stosuje się dodatkowo uziemiony ekran od strony warstwy wewnętrznej (Rys. 4.14 - warianty A i C) [13,20,105,110,182,241].

W praktyce znane są również rozwiązania, w których wszystkie warstwy uzwojenia wysokiego napięcia nawinięte są na taką samą wysokość, ale jest rozwiązanie mniej powszechne ze względu na problemy z wykonaniem izolacji jarzmowej [7,13,110].

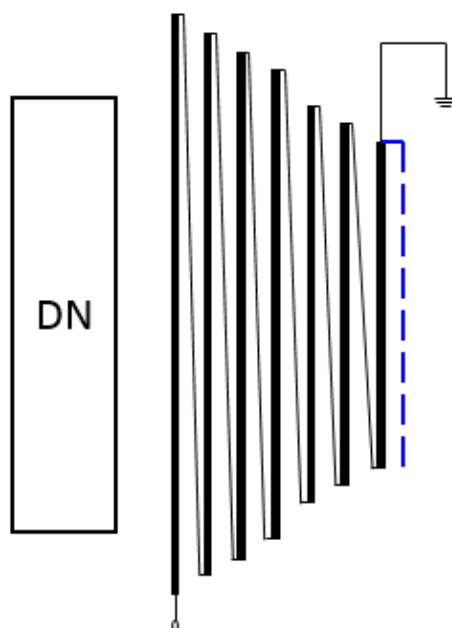


Rys. 4.14 Schematy uzwojeń wielowarstwowych z uziemionym punktem gwiazdowym od strony warstwy wewnętrznej (linia przerywana – ekran elektrostatyczny) [13]

W wariacie A uzwojenia, przedstawionym na Rys. 4.14, kolejne warstwy są nawinięte w przeciwnych kierunkach, co znacznie ułatwia proces produkcji, ale wpływa na zwiększenie różnicy napięć pomiędzy nimi (na skrajach warstw), co pociąga za sobą konieczność zwiększenia grubości izolacji papierowej lub zastosowanie szerszego kanału olejowego.

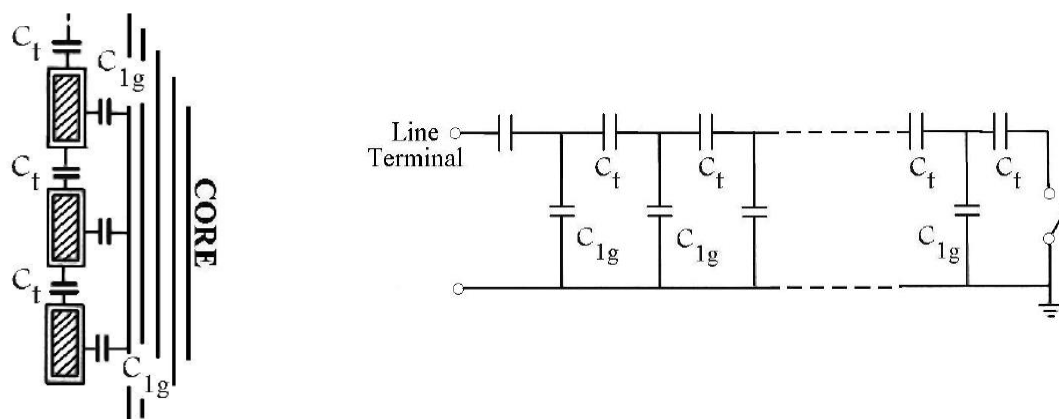
W wariacie B i C (Rys. 4.14) wszystkie warstwy są nawinięte w tym samym kierunku. W tym przypadku napięcia międzywarstwowe zmniejszają się w przybliżeniu dwukrotnie w porównaniu do wariantu A, ale wymagane jest odcinanie i łączenie ze sobą początku i końca przewodu nawojowego kolejnych warstw. Połączenia międzywarstwowe mogą być zrealizowane wewnątrz (wariant B) lub z zewnątrz (wariant C). We wszystkich przypadkach poszczególne warstwy są oddzielone od siebie kanałami olejowymi.

W praktyce spotyka się również uzwojenia warstwowe zasilane od strony warstwy wewnętrznej (Rys. 4.15). To rozwiązanie jest jednak stosowane bardzo rzadko.



Rys. 4.15 Przykładowy schemat połączeń warstw w uzwojeniu wielowarstwowym zasilanym od strony warstwy wewnętrznej [13]

Uproszczony schemat zastępczy uzwojenia jednowarstwowego do obliczenia jego pojemności wzdłużnej przedstawiono na Rys. 4.16. W schemacie tym występują elementy reprezentujące pojemności szeregowo  $C_t$  pomiędzy sąsiadującymi zwojami oraz pojemności doziemne  $C_{1g}$  zwojów. Wypadkową pojemność wzdłużną  $C_s$  oraz doziemną  $C_g$  takiego połączenia można opisać odpowiednio zależnościami (4.6) i (4.7) [23].



Rys. 4.16 Pojemnościowy schemat zastępczy uzwojenia jednowarstwowego [23]

$$C_s = \frac{C_t}{n-1} \quad (4.6)$$

$$C_g = n \cdot C_{1g} \quad (4.7)$$

gdzie: -  $C_t$  – pojemność pomiędzy sąsiadującymi zwojami,  
 -  $C_{1g}$  – pojemności doziemne uzwojenia,  
 -  $n$  – liczba zwojów w warstwie uzwojenia.

Szczególną zaletą uzwojeń wielowarstwowych, w stosunku do uzwojeń cewkowych, jest ich prosta konstrukcja, która znacząco ułatwia i przyspiesza proces produkcji. W takich uzwojeniach nie ma potrzeby stosowania przeplotów, wywracania cewek, czy wplatania zwojów ekranujących itp. Należy zaznaczyć, że producenci dużych transformatorów energetycznych, mogą z powodzeniem stosować oba typy uzwojeń i dla każdego z nich uzyskiwać poprawne rozwiązania, zarówno pod względem wytrzymałości mechanicznej, jak i elektrycznej (udarowej) [110,182]. Decydująca w tym przypadku jest zazwyczaj kwestia ekonomiczna, a w szczególności zużycie materiałów, które stanowią główny składnik kosztów wytworzenia transformatora energetycznego.

## **5 Narazenia przepięciowe izolacji uzwojeń transformatorów energetycznych**

Transformatory w trakcie eksploatacji są narażone na oddziaływanie napięcia roboczego oraz przepięć różnego pochodzenia. Oddziaływanie przepięć stanowi znaczne zagrożenie dla ich układów izolacyjnych, dlatego transformatory są poddawane działaniu napięcia przemiennego, udarowego piorunowego oraz łączeniowego podczas prób i badań odbiorczych. Zakres prób napięciowych określają odpowiednie normy krajowe, zagraniczne oraz międzynarodowe, np. [101,102,178,198]. Normy te określają próby typu, wyrobu oraz próby specjalne. Przepięcia piorunowe, jakim poddawana jest izolacja transformatorów podczas prób odbiorczych lub w czasie wyładowań atmosferycznych w przewody linii zasilających, stanowią szczególnie istotne zagrożenie ze względu na duże stromości przebiegów udarowych oraz ich wartości maksymalne. Bezpośrednie skutki ekonomiczne zjawisk przepięciowych stymulują prowadzenie badań i analiz mających na celu określenie rzeczywistych warunków oddziaływania przepięć na transformatory. Narazenia napięciowe izolacji fragmentu uzwojenia dołączonego do zacisku liniowego transformatora (określone przez zestaw odpowiednich napięć probierczych) różnią się od narażeń izolacji znajdującej się w głębi uzwojenia, co rodzi potrzebę prowadzenia bardzo dokładnych analiz przepięć występujących w uzwojeniach transformatorów [7,78,82,95,105,120,169,215].

W niniejszym rozdziale przedstawiono problematykę narażeń przepięciowych złożonego układu izolacyjnego transformatorów energetycznych, w szczególności izolacji uzwojeń.

### **5.1 Klasyfikacja przepięć w sieciach elektroenergetycznych**

Urządzenia elektroenergetyczne pracujące w sieciach elektroenergetycznych, w tym transformatory, są narażone na oddziaływanie napięć roboczych oraz przepięć. Przepięciem nazywany jest każdy wzrost napięcia w urządzeniu elektrycznym powyżej jego największego napięcia roboczego. Przepięcia najczęściej wynikają z wyładowań atmosferycznych (czynnik zewnętrzny), czynności łączeniowych lub stanów awaryjnych (czynniki wewnętrzne). Niezależnie od źródła przepięcia, może ono doprowadzić do uszkodzenia transformatora.

Wartości maksymalne oraz przebiegi przepięć docierających do zacisków urządzeń elektroenergetycznych i narażających ich izolację są uzależnione od rodzaju (źródła) przepięcia, miejsca jego wystąpienia i konfiguracji sieci oraz zastosowanych środków ochrony. W czasie prób probierczych urządzenia są poddawane znormalizowanym przebiegom przepięć mającym odwzorowywać zagrożenia jakim poddawana jest izolacja w czasie oddziaływania przepięć w eksploatacji. W Tabeli 5.1 przedstawiono ogólną klasyfikację napięć oraz przepięć narażających układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych wraz z ich podstawowymi parametrami. Przepięcia mogą mieć charakter krótkotrwały (przepięcia o udarowe o stromym i łagodnym czole) oraz długotrwały (przepięcia dorywcze). Przepięcia krótkotrwałe

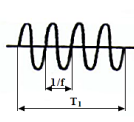
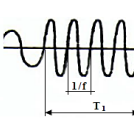
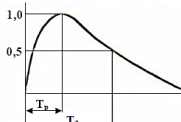
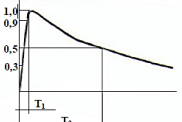
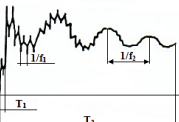


charakteryzują się zazwyczaj znacznie wyższymi wartościami maksymalnymi niż przepięcia długotrwałe [14].

W czasie normalnej pracy urządzeń, na ich izolację oddziałuje napięcie pracy ciągłej o częstotliwości sieciowej (50 lub 60 Hz). Takie napięcia nie stanowią zagrożenia dla izolacji urządzeń pracujących w sieci, ponieważ jest to ich znamionowe napięcie pracy, na jakie zostały zaprojektowane.

Przepięcia dorywcze występują w sieciach na skutek zwarć doziemnych (trwałych, łukowych), załączania nieobciążonych linii długich oraz podczas nagłej zmiany obciążenia. Takie przepięcia charakteryzują się częstotliwością zbliżoną do częstotliwości sieciowej, a ich wartości maksymalne oraz czas oddziaływania zależą od sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią [14,82].

*Tabela 5.1 Znormalizowane napięcia i przepięcia narażające izolację urządzeń pracujących w sieciach elektroenergetycznych [177]*

napięcia pracy ciągłej o małej częstotliwości	przepięcia dorywcze niskiej częstotliwości	przepięcia udarowe o łagodnym czole	przepięcia udarowe o stromym czole	przepięcia udarowe o bardzo stromym czole
				
$f = 50 \text{ Hz}$ lub $60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $f_i > 0,3 \text{ MHz}$ $f_i < 100 \text{ MHz}$ $f_2 > 30 \text{ kHz}$ $f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
$f = 50 \text{ Hz}$ lub $60 \text{ Hz}$ ( $T_1^*$ )	$f \geq 48 \text{ Hz}$ $f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
*	próba krótkotrwała częstotliwości sieciowej	próba udarowa łączeniowa	próba udarowa piorunowa	*

\* do oddzielnego ustalenia przez komitety aparaturowe dla potrzeb wytwórcy

Podczas stanów nieustalonych towarzyszących zwarciom doziemnym i ich wyłączeniu, nagłej zmianie obciążenia, łączeniu prądów pojemnościowych i indukcyjnych, a także w czasie występowania odległych wyładowań atmosferycznych w linii napowietrzne, powstają przepięcia udarowe o łagodnym czole. Mają one kształt aperiodyczny lub oscylacyjny. Przepięcia powstające w czasie operacji łączeniowych w sieciach nazywane są przepięciami łączeniowymi i zależą od rodzaju wyłącznika i jego wyposażenia w rezystory. Istotny jest również sposób kompensacji prądów ziemnozwarciowych, długość linii, charakter obciążenia oraz moc zwarcia stacji. Przepięcia o stosunkowo dużych wartościach maksymalnych powstają często podczas wyłączania nieobciążonych transformatorów i dławików, łączenia nieobciążonych linii, kabli lub baterii kondensatorów oraz podczas łączenia i pracy pieców łukowych [14,82].

Przepięcia udarowe o stromym czole są skutkiem wyładowań atmosferycznych bezpośrednio lub w pobliżu linii napowietrznych (przepięcia indukowane) [140,141,142]. Mogą wystąpić również na skutek przeskoków na izolacji zewnętrznej urządzeń oraz w czasie

wykonywania czynności łączeniowych w rozdzielniach. Zazwyczaj są to udary aperiodyczne o czasach trwania czoła od 0,1 do 20  $\mu\text{s}$  i czasach do półszczytu nie dłuższych niż 300  $\mu\text{s}$  [14].

Przebiegi udarowe o bardzo stromym czole (czasy trwania czoła poniżej 0,1  $\mu\text{s}$ ) są wynikiem operacji łączeniowych lub powstają na skutek przeskoków w urządzeniach o izolacji gazowej (najczęściej  $\text{SF}_6$ ). Na ich przebiegach pojawiają oscylacje o częstotliwościach około 1 MHz zawierające dodatkowo składową oscylacyjną o wysokiej częstotliwości [14,82].

Zgodnie z przedstawioną klasyfikacją, przy ustalaniu wymagań dla izolacji transformatorów, należy uwzględnić trwałe oddziaływanie na izolację napięcia roboczego sieci oraz oddziaływanie różnego rodzaju przebiegów (z uwzględnieniem możliwości pojawienia się udarów uciętych na czole lub grzbiecie).

Ze względu na rozwój oraz ewolucję sieci i urządzeń elektrycznych w nich pracujących, obecnie w analizie narażeń należy uwzględnić również inne rodzaje przebiegów przejściowych oddziałujących na izolację urządzeń. Mogą one wynikać zarówno z przekonfigurowania sieci, stanów awaryjnych i operacji łączeniowych, jak również z pracy urządzeń energoelektrycznych. Istotny jest intensywny rozwój oraz przyłączanie do sieci odnawialnych źródeł energii (farmy wiatrowe i fotowoltaiczne), a także coraz powszechniej występująca infrastruktura do ładowania pojazdów elektrycznych oraz magazyny energii. Uwzględnianie tych trendów niesie za sobą konsekwencje w postaci m.in. wymogu budowania bardzo „elastycznych” sieci oraz powstawania i propagacji przebiegów przejściowych (zarówno impulsowych, jak i oscylacyjnych). Tego rodzaju przebiegi, nawet w przypadku wartości maksymalnych nieprzekraczających poziomu ochrony ograniczników przebiegów, mogą stanowić duże zagrożenie dla izolacji urządzeń, szczególnie dla izolacji uzwojeń transformatorów, ze względu na zjawiska rezonansowe. Taka sytuacja może wystąpić, jeżeli przebiegi docierające do zacisków transformatora, posiada składową odpowiadającą częstotliwości rezonansowej uzwojenia. W wyniku zjawiska rezonansu, przebiegi wewnętrzne są wzmacniane i mogą doprowadzić do uszkodzenia izolacji uzwojeń, pomimo zastosowania ochrony przeciwprzebiegiowej [76,78].

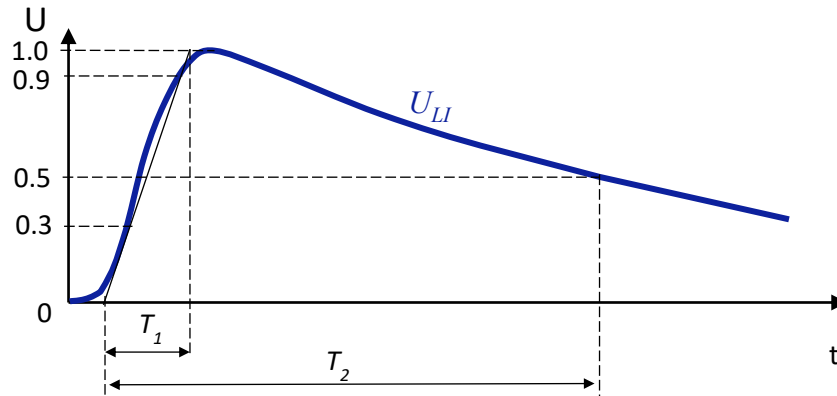
## 5.2 Charakterystyka wybranych przebiegów przebiegów

Dla układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów szczególnie niebezpieczne jest oddziaływanie przebiegów o stromym zboczu oraz tych zawierających składowe o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej uzwojeń.

W niniejszym rozdziale przedstawiono charakterystykę wybranych, typowych i nietypowych, przebiegów przebiegów narażających izolację transformatorów:

- znormalizowany udar napięciowy piorunowy 1,2/50  $\mu\text{s}$ ,
- udar piorunowy ucięty na czole i grzbiecie,
- udar prostokątny,
- udar piorunowy z wysokoczęstotliwościową składową oscylacyjną.

Znormalizowany udar piorunowy 1,2/50  $\mu\text{s}$  jest podstawowym przebiegiem stosowanym do badania transformatorów energetycznych. Udar ten charakteryzuje się szybkim narastaniem napięcia do osiągnięcia wartości szczytowej  $T_1=1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$  oraz powolnym opadaniem (czas do osiągnięcia połowy wartości szczytowej  $T_2=50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ). Badanie transformatora udarami piorunowymi stanowi jedną z podstawowych prób wyrobu i jest niej poddawana każda wyprodukowana jednostka. Typowy kształt udaru piorunowego przedstawiono na Rys. 5.1.



Rys. 5.1 Znormalizowany udar piorunowy napięciowy 1,2/50  $\mu\text{s}$  ( $T_1$  – czas do osiągnięcia wartości szczytowej,  $T_2$  – czas do osiągnięcia połowy wartości szczytowej)

Przebieg znormalizowanego udaru piorunowego  $U_{LI}$  w czasie można opisać następującą funkcją dwuwykładniczą (5.1) [72,76]:

$$U_{LI}(t) = -U_1 \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (5.1)$$

gdzie: -  $U_1$  – wartość szczytowa udaru piorunowego,

-  $t$  – czas oddziaływania udaru,

-  $\tau_1, \tau_2$  – stałe czasowe (dla udaru 1,2/50  $\mu\text{s}$ :  $\tau_1=0,405 \mu\text{s}$ ,  $\tau_2=68,2 \mu\text{s}$ ).

Jest to złożenie dwóch funkcji eksponencjalnych (5.2) i (5.3):

$$U_{LI1}(t) = -U_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad \text{dla czasu } t < 1,2 \mu\text{s} \quad (5.2)$$

$$U_{LI2}(t) = U_1 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad \text{dla czasu } t \geq 1,2 \mu\text{s} \quad (5.3)$$

Udar piorunowy może zostać ucięty w przypadku wystąpienia przeskoku na izolacji zewnętrznej transformatora. Powstały w ten sposób przebieg stanowi znaczne zagrożenie dla izolacji wewnętrznej transformatorów ze względu na bardzo dużą stromość ucięcia, która jest znacznie większa niż stromość narastania udaru. Przebieg czasowy udaru uciętego można otrzymać przez dodanie do (5.1) przesuniętej w czasie funkcji wykładniczej  $U_{-LI3}$  opisanej zależnością (5.4) [76]:

$$\begin{aligned} U_{-LI3}(t) &= -U_2 \left( e^{-\frac{t-T_c}{\tau_3}} - e^{-\frac{t-T_c}{\tau_4}} \right) && \text{dla czasu } t \geq T_c \\ U_{-LI3}(t) &= 0 && \text{dla czasu } t < T_c \end{aligned} \quad (5.4)$$

gdzie: -  $U_2$  – wartość szczytowa napięcia;  $\tau_3, \tau_4$  – stałe czasowe;  $T_c$  – czas do ucięcia.

Czas do ucięcia  $T_c$  może się zmieniać w szerokich granicach, przez co udar może zostać ucięty na czole lub na grzbiecie, co przedstawiono na Rys. 5.2. Przyjmuje się zazwyczaj, że czas trwania ucięcia  $t_c$  jest na poziomie 0,1  $\mu$ s. Ogólną zależność opisującą udar ucięty na grzbiecie  $U_{CLtail}$  można zatem wyrazić zależnością (5.5) [76]:

$$U_{CLtail}(t) = U_{LI}(t) + U_{-LI3}(t) \quad (5.5)$$

W celu matematycznego opisu udaru uciętego na czole, do zależności (5.5) należy dodać dodatkową funkcję  $U_h$  wyrażoną jako (5.6) [76]:

$$\begin{aligned} U_h(t) &= -U_3 \left( e^{-\frac{t-T_c-t_c}{\tau_5}} - e^{-\frac{t-T_c-t_c}{\tau_6}} \right) && \text{dla czasu } t \geq T_c + t_c \\ U_h(t) &= 0 && \text{dla czasu } t < T_c + t_c \end{aligned} \quad (5.6)$$

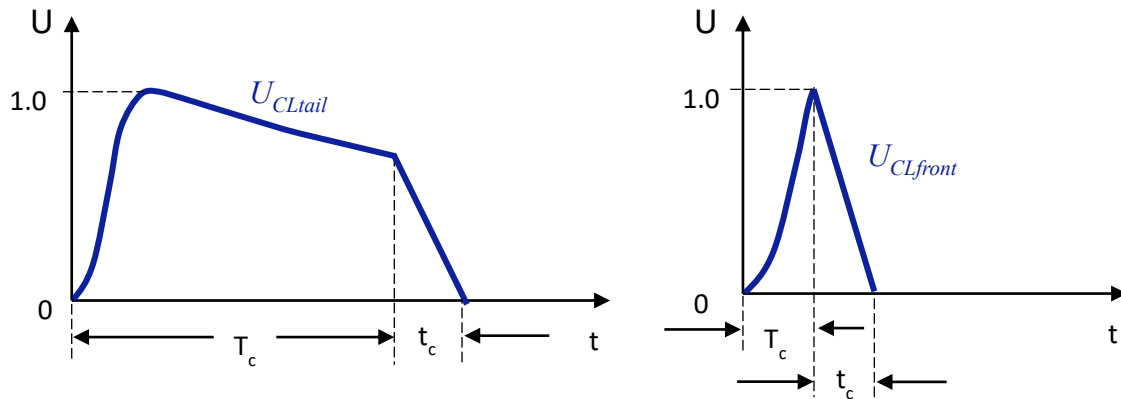
gdzie: -  $U_3$  – wartość szczytowa napięcia,

-  $\tau_5, \tau_6$  – stałe czasowe,

-  $t_c$  – czas trwania ucięcia.

Zatem, wypadkowa funkcja opisująca udar ucięty na czole  $U_{CLfront}$  przyjmuje postać (5.7):

$$U_{CLfront}(t) = U_{LI}(t) + U_{-LI3}(t) + U_h(t) \quad (5.7)$$



Rys. 5.2 Udar piorunowy ucięty na grzbiecie (a) oraz czole (b);  
oznaczenia jak we wzorach (5.4) - (5.7)

W przypadku pojawienia się tłumionych oscylacji  $U_{osc}$  następujących po ucięciu udaru w chwili czasu  $t=T_c+t_c$ , ich przebieg można reprezentować następującym wzorem (5.8) [76]:

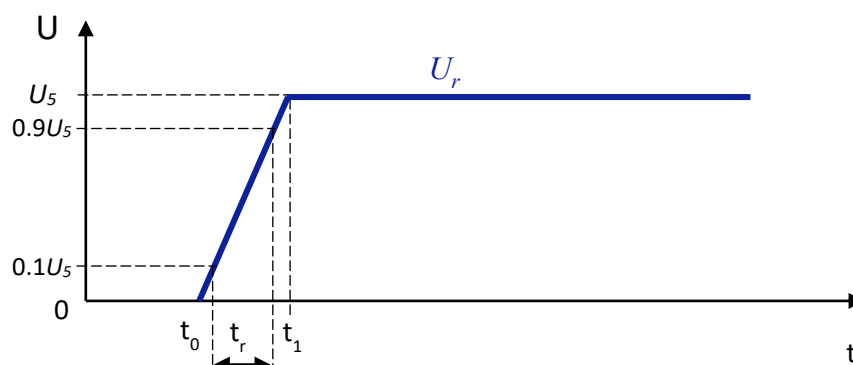
$$\begin{aligned} U_{osc}(t) &= -U_4 \left( e^{-\frac{t-T_c-t_c}{\tau}} \cdot \sin(\omega(t - T_c - t_c)) \right) && \text{dla czasu } t \geq T_c + t_c \\ U_{osc}(t) &= 0 && \text{dla czasu } t < T_c + t_c \end{aligned} \quad (5.8)$$

gdzie: -  $U_4$  – wartość szczytowa napięcia,

-  $\tau$  – stała czasowa tłumienia,

-  $\omega$  – częstotliwość oscylacji ( $\omega=2\pi f$ ).

Udar prostokątny przedstawiony na Rys. 5.3 odwzorowuje kształt napięcia, jakie pojawia się na zaciskach transformatora w przypadku zadziałania warystorowych ograniczników przepięć. Jego kluczowym parametrem, poza wartością szczytową, jest czas narastania  $t_r$  (od 10% do 90% wartości szczytowej), który świadczy o stromości udaru [76].



Rys. 5.3 Udar prostokątny i charakterystyczne parametry; oznaczenia jak we wzorze (5.9)

Udar prostokątny  $U_r$  można opisać zależnością (5.9) [76]:

$$\begin{aligned}
 U_r(t) &= 0 && \text{dla czasu } t < t_0 \\
 U_r(t) &= \beta t && \text{dla czasu } t_0 < t < t_1 \\
 U_r(t) &= U_5 && \text{dla czasu } t > t_1
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

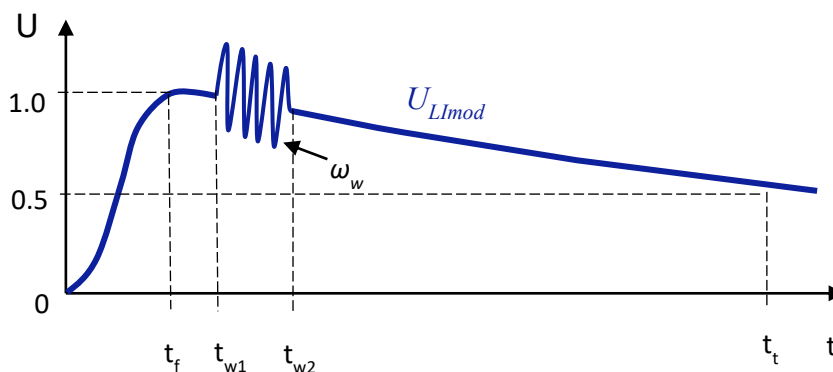
gdzie: -  $U_5$  – wartość szczytowa napięcia,

-  $t_0, t_1$  – początek i koniec narastania udaru,

-  $t_r$  – czas narastania udaru od 10% – 90%  $U_5$ ,

-  $\beta$  – współczynnik kierunkowy określający stromość narastania.

Inną klasę zagrożeń stanowią udary piorunowe modulowane, z nałożoną na grzbiecie składową oscylacyjną wysokiej częstotliwości (Rys. 5.4). Tego typu oscylacje mogą pojawić się w efekcie działania wyłączników próżniowych i ponownych zapłonów łuku elektrycznego pomiędzy stykami [76].



Rys. 5.4 Udar piorunowy modulowany – ze składową oscylacyjną wysokiej częstotliwości; oznaczenia jak we wzorach (5.10) i (5.11)

Przebieg czasowy udaru piorunowego modulowanego  $U_{LI\_mod}$  (5.10), ze składową oscylacyjną  $U_{mod}$  (5.11) występującą w czasie od  $t_{w1}$  do  $t_{w2}$ , można zapisać następującą zależnością (5.10) [76]:

$$U_{LI\_mod}(t) = U_{LI} \quad \text{dla czasu } t < t_{w1} \text{ i } t > t_{w2} \quad (5.10)$$

$$U_{LI\_mod}(t) = U_{LI} + U_{mod} \quad \text{dla czasu } t_{w1} < t < t_{w2}$$

$$U_{mod}(t) = U_6 e^{-\frac{(t-t_{w1})^2}{\tau_w}} \cdot \sin(\omega_w(t - t_{w1})) \quad (5.11)$$

gdzie: -  $U_6$  – amplituda składowej oscylacyjnej,

-  $\tau_w$  – stała czasowa tłumienia,

-  $t_{w1}, t_{w2}$  – czas początku i końca oscylacji,

-  $\omega_w$  – częstotliwość oscylacji ( $\omega_w = 2\pi f_w$ ).

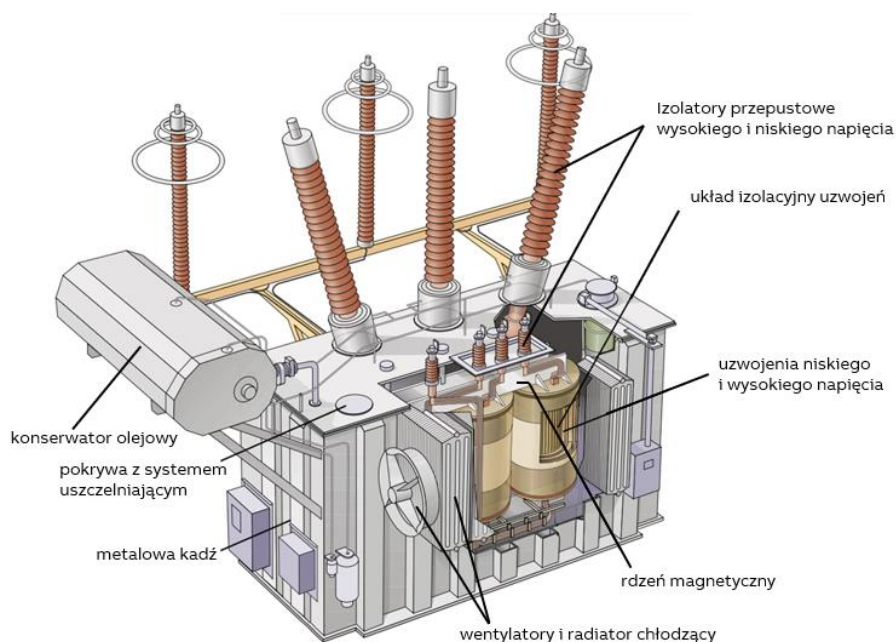
Badania i analiza rozkładów przebiegów w uzwojeniach transformatorów, pochodzących od typowych i nietypowych przebiegów przebiegów są istotne dla rozwoju bardziej niezawodnych transformatorów. Szczególnie istotne są udary oraz przebiegi o dużych stromościach  $dU/dt$ , które są niebezpieczne dla izolacji wzdłużnej w transformatorach. Przykładem może być oddziaływanie napięcia pochodzącego z układów *PWM* (*Pulse Width Modulation*) na układy izolacyjne transformatorów, co było przedmiotem wielu analiz, np. [15,88,162].

### 5.3 Układ izolacyjny transformatora

Obliczanie, projektowanie i budowa układu izolacyjnego należą do jednych z kluczowych aspektów w czasie całego procesu przygotowania transformatora, ze względu na ich bezpośredni wpływ na koszt oraz niezawodność transformatora. Jest to szczególnie ważne w przypadku transformatorów wysokich napięć. Aby zapewnić wysoką niezawodność izolacji transformatora, w czasie procesu jej obliczania i budowy należy wziąć pod uwagę dobór odpowiednich materiałów, uwzględnić wpływ różnych zjawisk fizycznych zachodzących w izolacji, odpowiednie wytyczne oraz doświadczenia projektowe, jak również kontrolować proces produkcji na całym jego etapie [78,120,251]. Dzięki takiemu kompleksowemu podejściu, możliwe jest zbudowanie niezawodnej izolacji, przy jednoczesnej optymalizacji kosztów materiałowych oraz produkcyjnych. Wymaga to jednak dużego zaangażowania ze strony projektantów oraz pracowników naukowo-badawczych w celu dokładnego oszacowania spodziewanych narażeń (elektrycznych, cieplnych i mechanicznych) na różnych poziomach napięć i dla różnych konfiguracji, topologii oraz połączeń uzwojeń. Obecnie, w tym celu stosowane są zaawansowane narzędzia obliczeniowe (oprogramowanie *FEM* i do analiz obwodowych, narzędzia komercyjne, oprogramowanie „własne” producentów) uwzględniające dane wytrzymałościowe otrzymane na bazie badań laboratoryjnych oraz z zależności empirycznych.

W celu odpowiedniego zaprojektowania układu izolacyjnego transformatora, samo ograniczenie maksymalnego natężenia pola elektrycznego w izolacji jest niewystarczające. Należy wziąć pod uwagę również inne czynniki mające wpływ na wytrzymałość dielektryczną izolacji, takie jak np.: rodzaj, kształt oraz czasowa charakterystyka napięcia, odpowiedź ze strony uzwojenia, kształt oraz stan elektrod, wpływ potencjalnych wyładowań niezupełnych, rodzaj oleju, itp. [73,78,95]. Z tego względu, projektowanie układu izolacyjnego transformatora stanowi jeden z najbardziej złożonych procesów i ma wpływ na bezpieczną eksploatację urządzenia.

Układ izolacyjny transformatorów można podzielić ogólnie na izolację zewnętrzną oraz wewnętrzną (Rys. 5.5). W skład izolacji zewnętrznej należy zaliczyć wszelkie elementy znajdujące się poza kadzią: osłony przepustów, odstępy izolacyjne pomiędzy zaciskami transformatora, odstępy powietrzne między uziemionymi częściami konstrukcyjnymi oraz elementami na potencjale. Izolacja zewnętrzna jest narażona na bezpośredni wpływ warunków atmosferycznych oraz innych narażeń środowiskowych, takich jak zabrudzenia czy czynniki biologiczne. Jednocześnie jest to izolacja regenerująca się, która w krótkim czasie odzyskuje całkowicie swoje właściwości izolacyjne po wyładowaniu zupełnym [72,82,84,95,105,223]. Uzasadnia to traktowanie tej izolacji tak samo jak izolacji zewnętrznej innych aparatów i urządzeń rozdzielni napowietrznych, dla których zostały ustalone międzynarodowo minimalne odstępy izolacyjne w zależności od znamionowego wytrzymywanego napięcia piorunowego i łączeniowego [177].

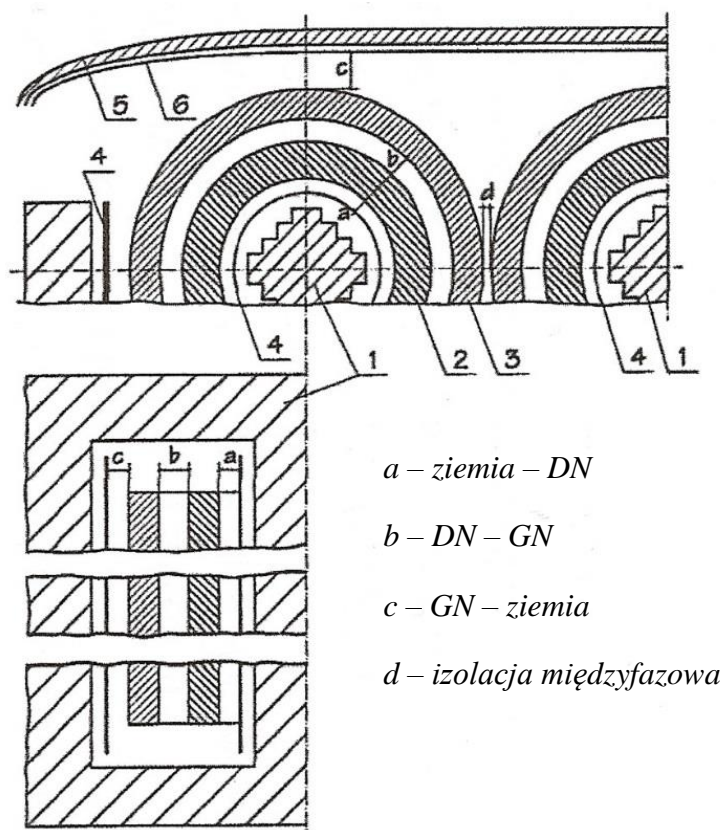


*Rys. 5.5 Ogólna konstrukcja transformatora z elementami izolacji zewnętrznej i wewnętrznej [42]*

W przeciwieństwie do układu izolacyjnego zewnętrznego, izolacja wewnątrz transformatora jest zabezpieczona przed bezpośrednim wpływem narażeń atmosferycznych i środowiskowych. Poza olejem izolacyjnym, jest to izolacja nieregenerująca się. W jej skład zalicza się między innymi: izolację uzwojeń, przepustów, odpływów, czy przełącznika zaczepów. Najbardziej skomplikowane, a zarazem najważniejsze problemy związane są

z izolacją uzwojeń, dlatego w dalszej części rozdziału zostanie przedstawiony tylko ten fragment izolacji wewnętrznej, na przykładzie uzwojenia o konstrukcji cewkowej (dyskowej). Zagadnienie izolacji uzwojeń jest bardzo obszerne, dlatego przedstawione zostało w sposób ogólny. Więcej informacji można znaleźć w cytowanej literaturze specjalistycznej, np. [84,95,105,182].

W układzie izolacyjnym uzwojeń transformatora można wyróżnić izolację główną oraz wzdlużną. Izolację główną stanowi izolacja pomiędzy poszczególnymi uzwojeniami w danej fazie (DN-GN), pomiędzy uzwojeniami, a uziemionymi elementami konstrukcyjnymi (głównie kadzią i rdzeniem) oraz pomiędzy fazami (Rys. 5.6). W praktyce, izolacja główna jest wykonywana jako izolacja twarda (twardy preszpan, tuleje bakelitowo-papierowe, elementy drewniane, itp.), lub miękka (papier izolacyjny nasycony olejem) [84,95,105,182].



Rys. 5.6 Izolacja główna transformatora, 1 – rdzeń, 2 – uzwojenie dolnego napięcia, 3 – uzwojenie górnego napięcia, 4 – uziemiony ekran, 5 – kadź, 6 – ekran magnetyczny, a, b, c, d – odstępów reprezentujące izolację główną [84]

W zależności od rodzaju sieci w jakiej pracuje transformator oraz sposobu połączenia jego punktu neutralnego z ziemią, izolacja uzwojeń może być wykonana w różny sposób. Przykładowo, w transformatorach pracujących w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, izolacja jest wykonywana jako pełna i niestopniowana. Uziemienie punktu neutralnego umożliwia zastosowanie stopniowania izolacji głównej, czyli zmniejszenia jej wytrzymałości elektrycznej (grubości) wraz z oddalaniem się od zacisku wejściowego i zbliżania do punktu neutralnego. Odległości izolacyjne pomiędzy uzwojeniami sąsiadujących faz oraz pomiędzy



uzwojeniami, a rdzeniem są zmniejszane stopniowo, zaczynając od zacisku liniowego, aż do punktu zerowego [84,95,105,182].

Na Rys. 5.7 przedstawiono uproszczone modele izolacji twardej transformatora w układzie płaskim oraz cylindrycznym. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego  $E_k$ , w tak utworzonych warstwach izolacji, przy napięciu przemiennym lub udarowym można wyznaczyć z zależności (5.12) i (5.13):

- układ płaski (Rys. 5.7a):

$$E_k = \frac{U}{\varepsilon_k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i}} \quad (5.12)$$

- układ cylindryczny (Rys. 5.7b):

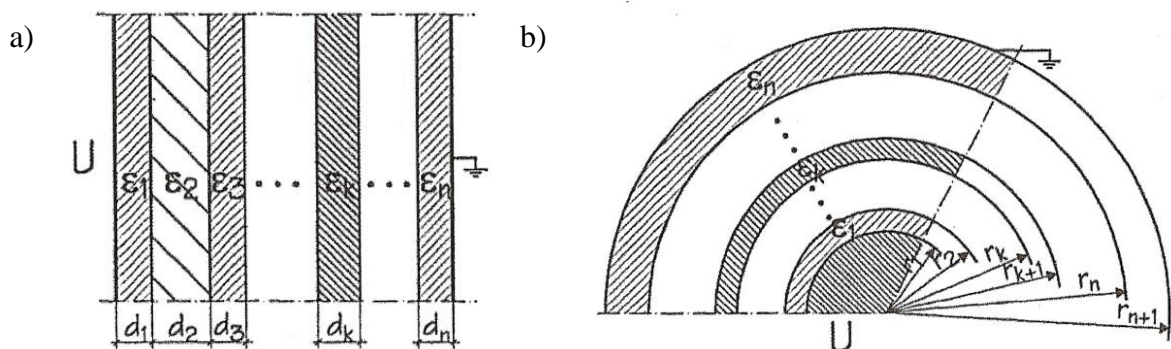
$$E_k = \frac{U}{r_k \cdot \varepsilon_k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (5.13)$$

gdzie: -  $U$  – wartość napięcia,

-  $\varepsilon_k, \varepsilon_i$  – przenikalności dielektryczne warstw izolacji,

-  $d_i, r_k, r_i$  – wymiary geometryczne wg Rys. 5.7.

-  $n$  – liczba warstw.



Rys. 5.7 Uproszczone modele izolacji twardej transformatora (olej – przegrody) w środkowym obszarze uzwojenia: a – płaski, b – cylindryczny [84]

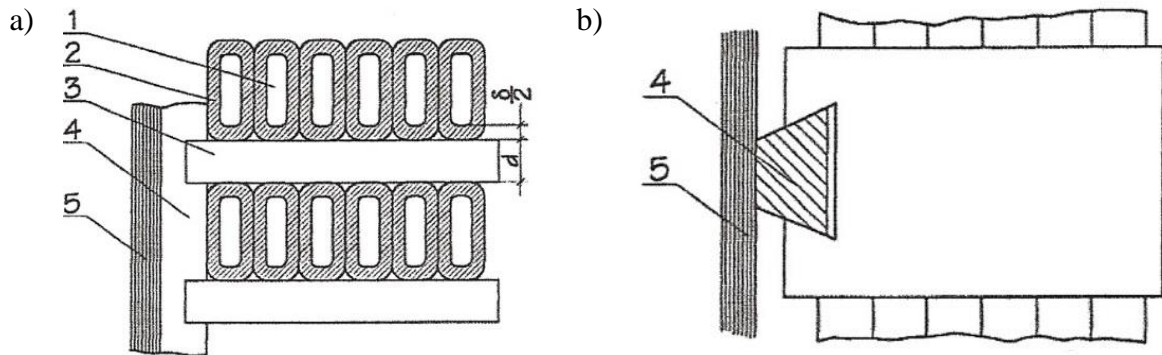
Izolacja wzdłużna to izolacja elementów znajdujących się w obrębie tego samego uzwojenia, czyli izolacja międzycewkowa i międzyzwojowa (Rys. 5.8), a także izolacja pomiędzy skrajnymi cewkami uzwojenia, a pierścieniami ekwipotencjalnymi stanowiącymi ekran. Izolacja wzdłużna jest poddawana działaniu największych narażeń w czasie prób napięciem udarowym. Wynika to z nieliniowego charakteru początkowego rozkładu napięcia w uzwojeniu i towarzyszących mu znacznych gradientów potencjału elektrycznego w początkowym fragmencie uzwojenia [7,9,10,14,84].

Izolację zwojową stanowi oplot papieru izolacyjnego, o którego grubości decyduje jego odporność na narażenia mechaniczne (nawijanie, montaż) oraz elektryczne (próby napięciowe). Czasami, przewody miedziane pokryte są dodatkowo warstwą emalii izolacyjnej odpornej na działanie gorącego oleju. Dopuszczalne wartości napięć międzyzwojowych  $U_d$  określa się w przybliżony sposób, korzystając z zależności empirycznych (5.14) i (5.15) [84,182]:

$$U_d = 22 \cdot \delta^{0,8} kV \quad \text{dla napięcia 50Hz} \quad (5.14)$$

$$U_d = 55 \cdot \delta^{0,8} kV \quad \text{dla udaru piorunowego 1,2/50 } \mu s \quad (5.15)$$

gdzie: -  $\delta$  – dwustronna grubość izolacji zwojowej wyrażona w mm.

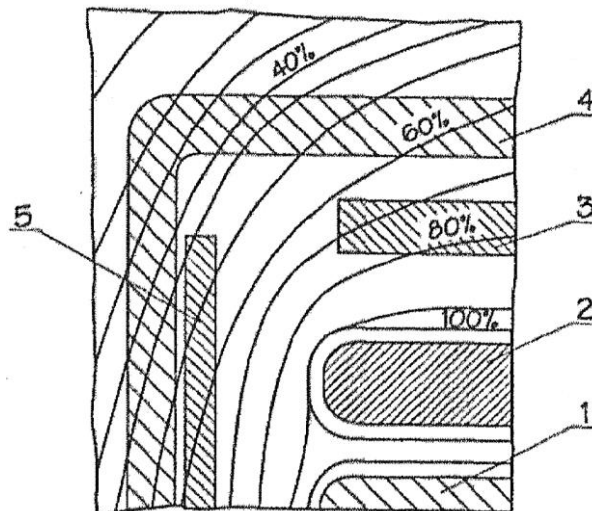


Rys. 5.8 Izolacja międzycewkowa i międzyzwojowa: a) widok z boku, b) widok z góry: 1 – przewody nawojowe, 2 – oplot papieru, 3 – przekładki międzycewkowe, 4 – listwa preszpanowa, 5 – tuleja izolacji głównej [84]

Izolacja międzycewkowa (Rys. 5.8a) zapewnia wzajemną izolację pomiędzy sąsiednimi cewkami tego samego uzwojenia, swobodny przepływ oleju w kanale międzycewkowym oraz przenoszenie wzdłuż uzwojenia sił mechanicznych występujących w czasie zwarcia oraz w trakcie montażu uzwojeń. W skład izolacji międzycewkowej należy zaliczyć fragment oplotu papieru izolacyjnego (izolacja zwojowa), kanał olejowy oraz preszpanowe przekładki dystansowe [84,182].

Na krańcach uzwojeń (Rys. 5.9), szczególnie w pobliżu zacisku wejściowego, występuje silnie niejednorodny rozkład natężenia pola elektrycznego, dlatego często konieczne jest zastosowanie pierścieni ekwipotencjalnych łagodzących tę niejednorodność i ograniczających wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i zwiększające pojemność wzdłużną uzwojenia. W obszarze tym, oprócz pierścieni ekwipotencjalnych, znajdują się także pierścienie izolacyjne kątowe (kształtem zbliżone do powierzchni ekwipotencjalnych), które zwiększają wytrzymałość izolacji. Pomiedzy uzwojeniami fazowymi, znajdują się dodatkowo preszpanowe bariery izolacyjne zwiększające wytrzymałość elektryczną całego układu izolacyjnego i wydłużające drogę ewentualnego wyładowania [84,95,182].

Przedstawione podziały układu izolacyjnego są bardzo przydatne przy opisie konstrukcji, ale należy pamiętać, że w układzie izolacyjnym uzwojeń nie ma wyraźnych granic podziału pomiędzy poszczególnymi fragmentami izolacji. Niektóre elementy można jednoznacznie zaliczyć do izolacji wzdłużnej, czy głównej, ale na przykład przestrzeń olejowa jest obszarem wspólnym obu tych grup. Najbardziej niebezpieczną częścią układu izolacyjnego transformatora, z punktu widzenia narażeń elektrycznych, jest obszar początkowych cewek uzwojenia (ze względu na oddziaływania przepięć), a szczególnie ich krawędzi (ze względu na silnie niejednorodny rozkład pola elektrycznego) [95,105,182].



Rys. 5.9 Izolacja krańców uzwojenia: 1 – uzwojenie, 2 – pierścień ekwipotencjalny, 3, 5 – przegrody izolacyjne, 4 pierścień izolacyjny preszpanowy, 5 – bariera izolacyjna [84]

Podczas projektowania transformatorów dąży się do uzyskania konstrukcji o odstępach izolacyjnych zwymiarowanych w taki sposób, aby ryzyko uszkodzenia każdego z nich w czasie prób napięciowych było jednakowe. Można wtedy mówić o wewnętrznej koordynacji izolacji transformatora i teoretycznie najbardziej ekonomicznej konstrukcji układu izolacyjnego [95].

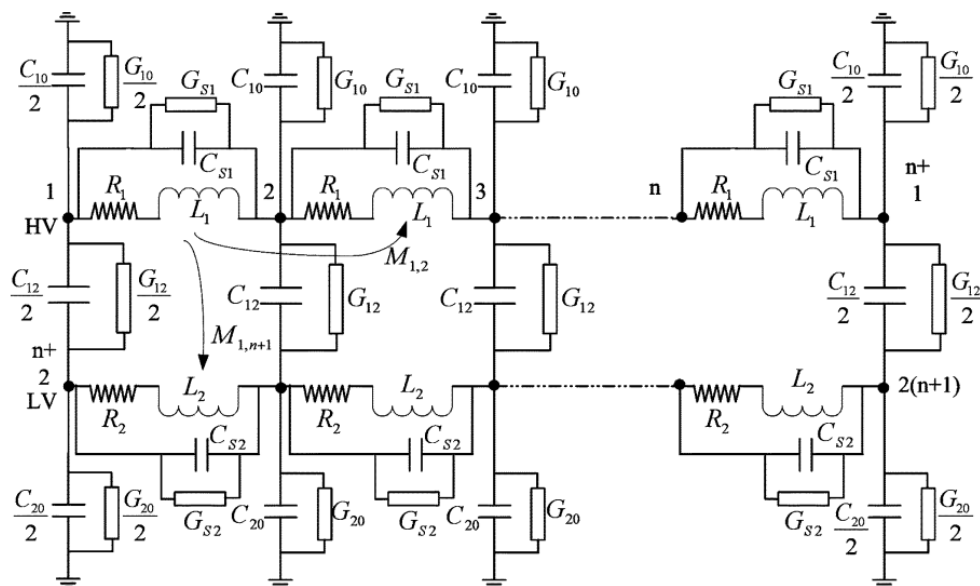
## 5.4 Zjawiska przepięciowe w uzwojeniach transformatorów

Przepięcia powstające w sieci elektroenergetycznej, po przemieszczeniu się wzdłuż linii zasilającej docierają do transformatora i wówczas na jego zaciskach pojawiają się przepięcia narażające jego izolację zewnętrzną. Ich przebiegi zależą od rodzaju powstających przepięć (piorunowe, łączeniowe, długotrwałe) oraz charakterystyki zastosowanych ograniczników przepięć i sposobu ich włączenia. Jeżeli ograniczniki nie są bezpośrednio połączone z zaciskami wejściowymi transformatora, to na przepięcia mają wpływ także spadki napięć na połączeniach tych urządzeń, przez co przebiegi na transformatorze mogą różnić się od napięć na działających ogranicznikach przepięć [81,82].

Przepięcia, które pojawiają się na zaciskach liniowych transformatora są źródłem przepięć wewnętrznych występujących w uzwojeniach. W krytycznym przypadku może dojść do uszkodzenia izolacji wewnętrznej transformatora i jego awarii. Narażenia przepięciowe izolacji uzwojeń są zależne od parametrów udaru napięciowego (wartości maksymalnej, kształtu, czasu oddziaływania) oraz budowy samego uzwojenia i jego reakcji na pojawiające się wymuszenie napięciowe, wynikającej z parametrów  $RLC$  układu uzwojeń. Wewnątrz uzwojenia mogą zatem wystąpić przebiegi napięcia znacznie różniące się od przebiegów napięcia na zacisku wejściowym transformatora, wynikające z pojemnościowych i indukcyjnych sprzężeń pomiędzy elementami składowymi transformatora. Z tego względu uzwojenia o mechanicznie różnej konstrukcji, zachowują się odmiennie podczas oddziaływania przepięć i charakteryzują się różnym poziomem narażeń [33,78,82,89,139,164,204,215,219].

W celu właściwej oceny narażeń izolacji transformatorów oraz odpowiedniego obliczenia i budowy transformatora, prowadzi się obliczenia przepięć w uzwojeniach przy wykorzystaniu modeli matematycznych uzwojeń z elementami skupionymi, które reprezentują zjawiska występujące w układach izolacyjnych, torach prądowych i obwodach magnetycznych transformatorów [81].

W analizach przepięciowych uzwojenia transformatorów dzieli się na sekcje reprezentujące fragmenty uzwojeń, takie jak pojedyncze cewki, warstwy lub ich grupy. Następnie sekcje reprezentowane są za pomocą zastępczych parametrów opisujących ich indukcyjności własne i wzajemne, pojemności wzdłużne i poprzeczne, rezystancje przewodów i konduktancje izolacji. Wybór wielkości sekcji zależy od geometrii uzwojenia oraz zakresu częstotliwości, w jakim analizy mają być prowadzone. Przykładowy schemat zastępczy jednofazowego transformatora przedstawiono na Rys. 5.10. W schemacie tym, indeksy 1 i 2 odnoszą się odpowiednio do uzwojenia górnego napięcia (HV) oraz dolnego napięcia (LV). Parametry zastępcze sekcji uzwojeń mogą być obliczane analitycznie, bazując na znanych z literatury zależnościach empirycznych, lub numerycznie, za pomocą specjalistycznego oprogramowania [78,82,158].

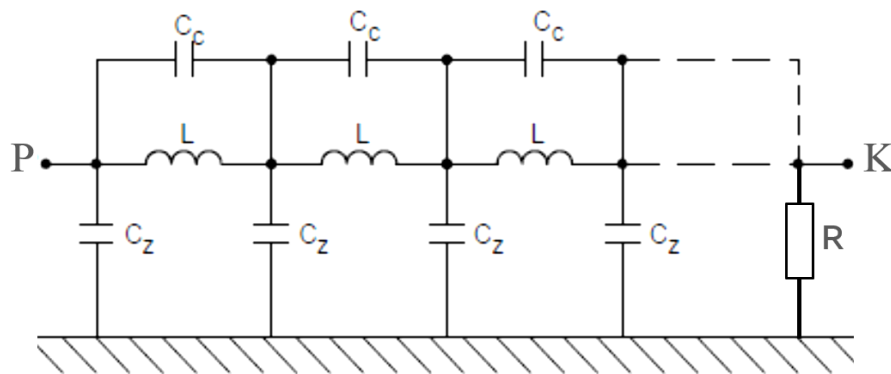


Rys. 5.10 Schemat zastępczy uzwojeń transformatora jednofazowego:  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  – pojemności doziemne uzwojenia,  $G_{10}$ ,  $G_{20}$  – konduktancje doziemne,  $C_{12}$ ,  $G_{12}$  – pojemności i konduktancje pomiędzy uzwojeniami,  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  – pojemności wzdłużne uzwojeń,  $G_{s1}$ ,  $G_{s2}$  – konduktancje wzdłużne uzwojeń,  $L_1$ ,  $R_1$  i  $L_2$ ,  $R_2$  – indukcyjności i rezystancje uzwojeń,  $M_{i,j}$  – indukcyjności wzajemne pomiędzy sekcjami  $i$ ,  $j$  [158]

Schemat zastępczy pełnego transformatora jest bardzo złożony, dlatego też w praktyce korzysta się ze schematu uproszczonego, reprezentującego jedynie te wielkości fizyczne, które są istotne dla typu i szczegółowości prowadzonych analiz (Rys. 5.11). Szczególnie problematyczne jest prowadzenie analiz wysokoczęstotliwościowych, w których poszczególne parametry są zależne od częstotliwości [78,82,158].

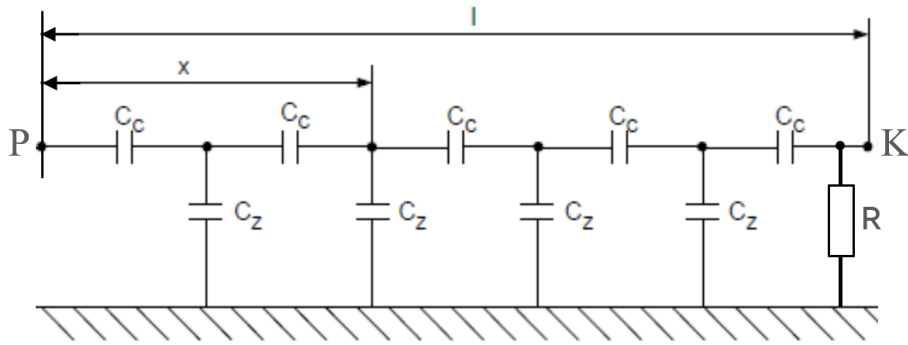
W uproszczonym podejściu, często pomija się sprzężenia magnetyczne  $M$ , natomiast rola sprzężeń pojemnościowych  $C_c$  i  $C_z$  musi być uwzględniona, ponieważ pełnią one istotną rolę w kreowaniu odpowiedzi uzwojenia na pojawiające się przepięcie. Zazwyczaj pomija się również rezystancje uzwojeń  $R$  i upływność izolacji  $G$ . Te parametry mogą zostać w późniejszym etapie uwzględnione w postaci współczynnika tłumienności [72,97].

W trakcie analizy uzwojenia transformatora, traktuje się je często jako cewkę jednowarstwową o równomiernie rozłożonych parametrach  $C_c$ ,  $C_z$  i  $L$  (Rys. 5.11). Gdy do zacisków wejściowych uzwojenia transformatora dociera przepięcie o dużej stromości, założymy w postaci fali prostokątnej  $U_0$ , powstają w nim drgania ze względu na obecność elementów o charakterze pojemnościowym i indukcyjnym. W czasowym przebiegu tych drgań można wyróżnić trzy charakterystyczne stany: początkowy, przejściowy oraz końcowy. Dla przebiegu napięciowego o bardzo dużej stromości narastania, indukcyjności uzwojenia stanowią bardzo dużą impedancję i mogą być, bez dużego błędu, pominięte i traktowane jako przerwa w obwodzie. Z tego względu, w początkowej fazie oddziaływania fali udarowej na transformator, uzwojenia można potraktować jako szeregowo-równoległy układ pojemności wzdlużnych i poprzecznych, które stanowią pojemność wejściową transformatora (zazwyczaj rzędu kilkuset pF) (Rys. 5.12) [72,105].

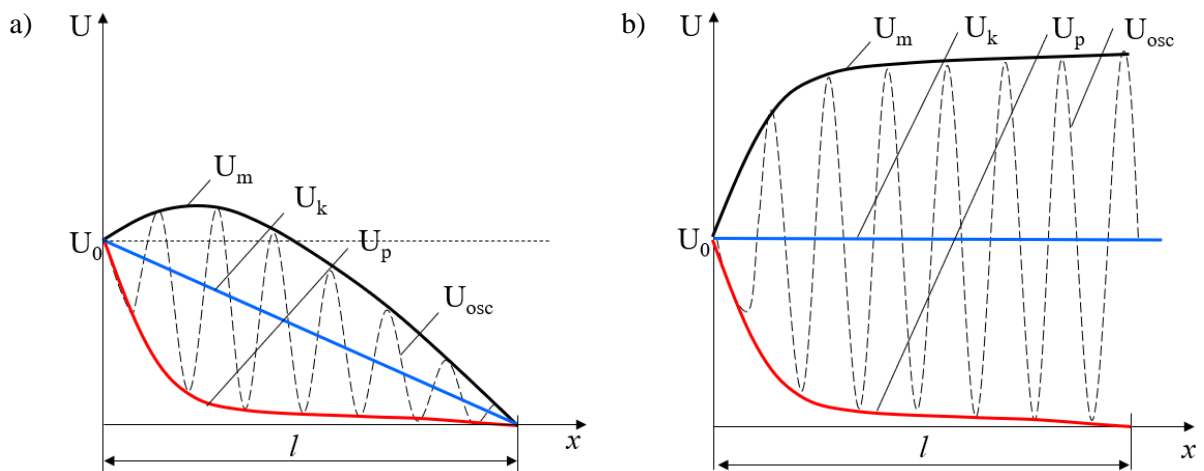


Rys. 5.11 Uproszczony schemat zastępczy uzwojenia transformatora:  $L$  – indukcyjności własne uzwojenia,  $C_c$  – pojemności wzdlużne,  $C_z$  – pojemności doziemne,  $R$  – rezystancja doziemna końca uzwojenia ( $R=0$  – koniec uziemiony,  $R=\infty$  - koniec izolowany),  $P$ ,  $K$  – oznaczenie początku i końca uzwojenia;  $x$  – odcinek uzwojenia,  $l$  – długość uzwojenia

W stanie początkowym oddziaływania udaru napięciowego, przez uzwojenie płynie prąd pojemnościowy wymuszający powstanie pojemnościowego rozkładu napięcia  $U_p$  wzdluż wysokości uzwojenia (Rys. 5.13). Ze względu na obecność pojemności doziemnych występujących na całej wysokości uzwojenia, rozkład ten może być silnie nieliniowy. Następnie, rozkład ten powoduje powstanie w uzwojeniu drgań wyrównawczych  $U_{osc}$ , które prowadzą do ustalenia się wzdluż uzwojenia rozkładu końcowego napięcia  $U_k$ , o liniowym charakterze. Drgania wyrównawcze mają charakter oscylacji tłumionych. Obwiednie maksymalnych drgań  $U_m$  (Rys. 5.13) przedstawiają rozkład największych wartości napięcia wzdluż uzwojenia i w przybliżeniu odpowiadają różnicy napięć pomiędzy rozkładem początkowym a końcowym (reguła struny drgającej) [72,105].

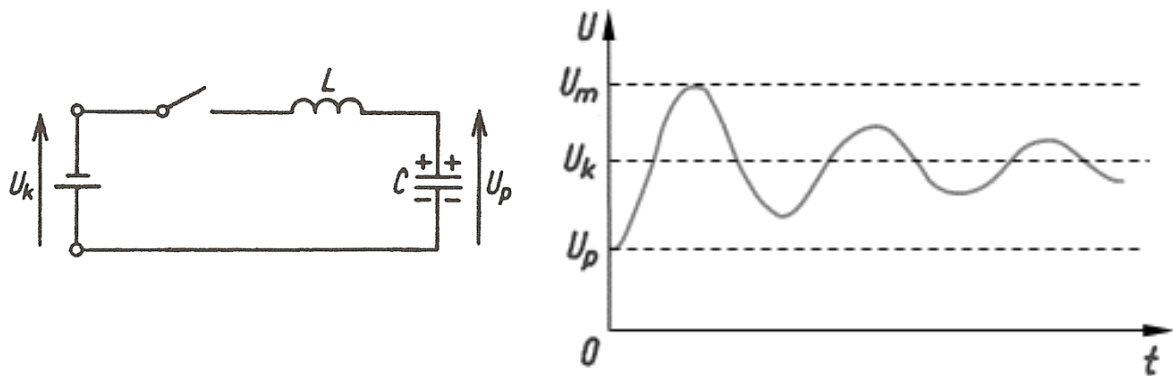


Rys. 5.12 Schemat uzwojenia transformatora dla stanu początkowego oddziaływania przepięcia o stromym zboczku narastającym;  $C_c$ ,  $C_z$  – pojemności wzdłużne i doziemne,  $R$  – rezystancja doziemna końca uzwojenia ( $R=0$  – koniec uziemiony,  $R=\infty$  - koniec izolowany),  $P$ ,  $K$  – oznaczenie początku i końca uzwojenia



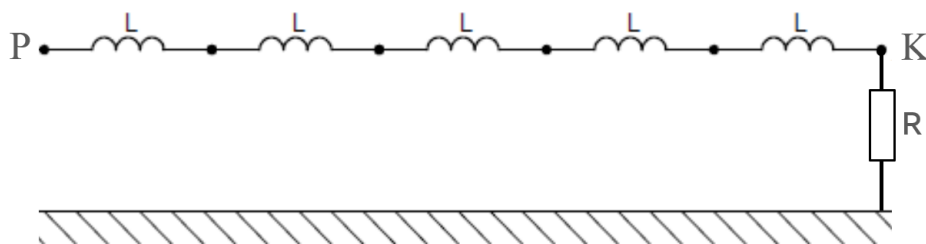
Rys. 5.13 Rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia: a) z końcem uziemionym, b) z końcem izolowanym;  $U_p$  – rozkład początkowy,  $U_k$  – rozkład końcowy,  $U_m$  – obwiednia maksymalnych drgań,  $U_{osc}$  – oscylacyjne przebiegi wyrównawcze pomiędzy  $U_p$  i  $U_m$

Mechanizm powstawania drgań wyrównawczych w uzwojeniu można interpretować w sposób uproszczony przez przyporządkowanie dowolnemu punktowi uzwojenia elementarnego obwodu drgającego (Rys. 5.14). Taki obwód zawiera źródło napięcia stałego o wartości równej napięciu końcowemu  $U_k$ , indukcyjność  $L$  oraz pojemność  $C$  naładowaną w danym punkcie uzwojenia do wartości napięcia początkowego  $U_p$ . Zmianie napięcia od  $U_p$  do wartości  $U_k$  towarzyszą oscylacje w obwodzie  $LC$ . Wypadkowy rozkład napięcia w uzwojeniu, w każdej chwili czasu jest wynikiem superpozycji określonych wartości wielu przebiegów oscylacyjnych, które powstają w elementarnych obwodach drgających, które składają się na całość uzwojenia. Napięcie w każdej chwili czasu i w każdym punkcie uzwojenia, przyjmuje różne wartości z przedziału pomiędzy wartością początkową i wartością, która odpowiada obwiedni maksymalnych drgań [72,96].



Rys. 5.14 Obwód drgający LC (a) oraz przebieg oscylacyjny napięcia (b);  $U_p$  – wartość początkowa,  $U_k$  – wartość końcowa,  $U_m$  – wartość maksymalna [72]

W stanie końcowym oddziaływania fali udarowej, o zjawiskach przepięciowych w uzwojeniu decydują już tylko indukcyjności  $L$ , a wpływ pojemności  $C_c$  i  $C_z$  jest pomijalny. Dlatego rozkład końcowy napięcia  $U_k$  wzdłuż uzwojenia transformatora jest liniowy (Rys. 5.13). Schemat zastępczy uzwojenia dla stanu końcowego przedstawiono na Rys. 5.15.

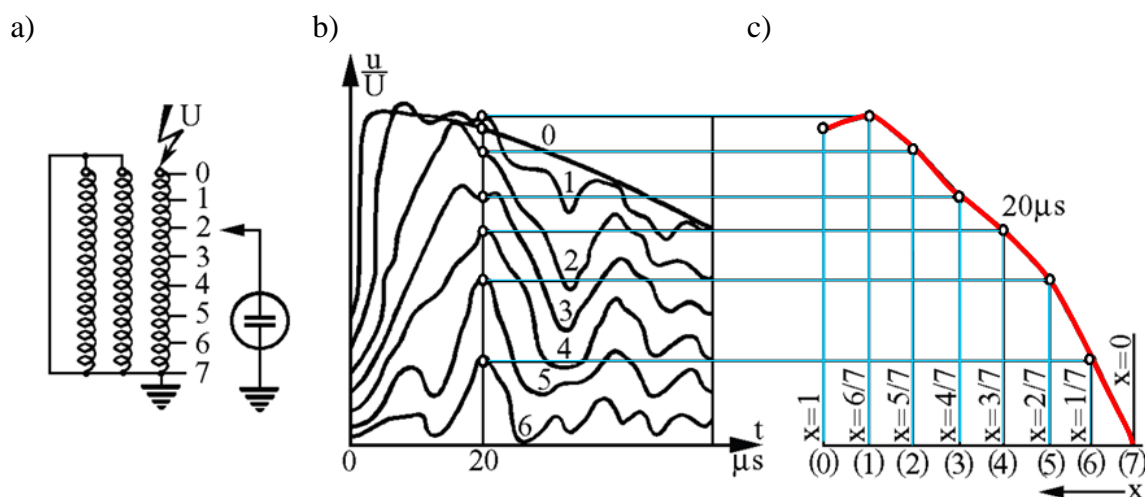


Rys. 5.15 Schemat uzwojenia dla stanu końcowego oddziaływania udaru napięciowego;  $L$  – indukcyjności własne uzwojenia,  $R$  – rezystancja doziemna końca uzwojenia ( $R=0$  – koniec uziemiony,  $R=\infty$  – koniec izolowany),  $P$ ,  $K$  – oznaczenie początku i końca uzwojenia

Amplituda drgań wyrównawczych oraz poziom narażeń napięciowych izolacji uzwojeń zależą od stromości czoła fali napięciowej, która dociera do uzwojenia – im większa stromość czoła fali tym większa amplituda drgań. Wynika z tego, że uzwojenia transformatora są szczególnie zagrożone przy oddziaływaniu udarów uciętych [72,96,105].

Na rozkład początkowy napięcia praktycznie nie ma wpływu to, czy punkt neutralny uzwojenia jest uziemiony (w przypadku dużych stosunków pojemności  $C_z/C_c$ ), czy nie, natomiast rozkład końcowy jest zależny od warunków panujących na końcu uzwojenia. W przypadku uziemionego punktu zerowego prąd płynący przez indukcyjność powoduje powstanie równomiernego spadku napięcia wzdłuż uzwojenia od wartości maksymalnej  $U_0$  do zera (Rys. 5.13a). Jeżeli punkt zerowy jest izolowany, to napięcie na całym uzwojeniu ustala się na poziomie  $U_k=U_0$  (Rys. 5.13b). Analizując wykresy rozkładów początkowych i obwiedni maksymalnych drgań należy stwierdzić, że największym narażeniem przepięciowym jest poddawana izolacja początkowych cewek uzwojenia z uziemionym punktem neutralnym oraz cewek końcowych, w przypadku uzwojenia z nieziemionym punktem neutralnym. Zagrożenie to jest tym większe im bardziej rozkład początkowy odbiega od rozkładu końcowego, czyli im bardziej jest nieliniowy [72,105].

Podczas oddziaływania na transformator przepięć o pochodzeniu atmosferycznym oraz napięć probierczych, może być mowa tylko o chwilowych rozkładach napięcia, ponieważ wartości szczytowe napięcia względem ziemi występują niejednocześnie w różnych punktach uzwojenia. Zatem, aby otrzymać realny obraz zagrożenia izolacji należy wyznaczyć obwiednię wszystkich chwilowych rozkładów napięcia. Rozkłady te można wyznaczyć eksperymentalnie lub obliczeniowo. Sposób wyznaczenia obwiedni maksymalnych drgań metodą eksperymentalną został przedstawiony na Rys. 5.16 – dla transformatora z uziemionym punktem gwiazdowym – badane uzwojenie jednej fazy, dwa pozostałe uzwojenia zwarte i uziemione [105].



Rys. 5.16 Metoda eksperymentalna wyznaczania rozkładów napięcia:  
a) schemat pomiaru, b) oscylogramy napięć w uzwojeniu z uziemionym punktem zerowym, c) rozkład napięcia w chwili  $t=20 \mu s$  [105]

W przedstawionej metodzie do zacisku wybranego uzwojenia doprowadza się udary probiercze i rejestruje się na oscyloskopie przebiegi napięcia względem ziemi, w punktach pomiarowych zlokalizowanych na różnych wysokościach uzwojenia. Przecinając otrzymany zestaw przebiegów napięć liniami pionowymi i przenosząc te punkty na drugi wykres  $u=f(x)$ , gdzie  $x$ , to punkty zlokalizowane na różnych wysokościach uzwojenia, otrzymuje się rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia w danej chwili czasu (przykładowo na Rys. 5.16c dla  $t=20 \mu s$ ). Analogicznie wyznacza się początkowy rozkład napięcia (dla chwili  $t=0^+$ ). Metoda ta ma zastosowanie zarówno dla uzwojenia z końcem uziemionym, jak i izolowanym [105].

Przy zasilaniu transformatora napięciem przemiennym o częstotliwości 50 – 500 Hz, rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia jest praktycznie prostoliniowy. Również w przypadku oddziaływania na uzwojenie przepięć łączeniowych lub probierczych udarów łączeniowych (250/2500  $\mu s$ ) można założyć, że wszystkie chwilowe rozkłady są prostoliniowe, ze względu na małą stromość tych przebiegów w porównaniu z udarami piorunowymi 1,2/50  $\mu s$  [105].

Podczas oddziaływania przepięć, w uzwojeniach transformatorów naprężeniu ulega zarówno izolacja główna, jak i wzdłużna. Zagrożenie izolacji głównej jest związane z amplitudą przepięcia, natomiast izolacji wzdłużnej ze stromością czoła fali. W praktyce niezbędne jest stosowanie środków ograniczających te narażenia, aby poprawić niezawodność transformatora, a tym samym całego systemu elektroenergetycznego [72].



### 5.4.1 Początkowy i pseudo-początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu

W początkowej chwili oddziaływania stromego przepięcia na transformator, w uzwojeniu pojawia się krótkotrwały rozkład napięcia zależny od układu pojemności wzdłużnych i poprzecznych (Rys. 5.12). Rozkład ten nazywa się rozkładem pojemnościowym, lub początkowym. Układ pojemności w uzwojeniu zależy ściśle od jego geometrii: wzajemnego ułożenia zwojów, cewek oraz warstw względem siebie i względem uziemionych części konstrukcyjnych transformatora, takich jak kadź, rdzeń oraz elementy montażowe. Każda zmiana w geometrii uzwojenia ma zatem odzwierciedlenie w wypadkowych wartościach pojemności doziemnych i szeregowych i wpływa na kształt rozkładu początkowego napięcia [7,78,95,105].

Rozkład początkowy (pojemnościowy) jest pojęciem czysto teoretycznym, rozważanym przy założeniu, że schemat zastępczy uzwojenia składa się tylko z pojemności wzdłużnych i poprzecznych, gdy do transformatora dociera fala udarowa prostokątna o nieskończonej stromości narastania. Jest to zatem rozkład pojawiający się w uzwojeniu skokowo w chwili  $t=0^+$ . Przy jego wyznaczaniu, uzwojenie traktuje się jako układ izolowanych od siebie pierścieni, odzwierciedlających rzeczywisty rozkład geometryczny zwojów i elementów przewodzących w transformatorze. Poszczególne pierścienie są traktowane jak sondy w polu elektrostatycznym panującym w uzwojeniu. Rozkład pola elektrostatycznego w takim układzie jest narzucony przez elementy konstrukcyjne uzwojenia o wymuszonym potencjale (np. zasilany pierwszy zwój, cewka, lub warstwa, ekrany, pierścienie ekwipotencjalne, itp.) oraz uziemione. W takim podejściu zaniedbuje się zazwyczaj połączenia międzycewkowe oraz międzywarstwowe.

W naturze, udary o nieskończonej stromości nie występują, dlatego czysto pojemnościowy rozkład początkowy można traktować jako umowną granicę, do jakiej dążyłoby chwilowe rozkłady napięcia w uzwojeniu, przy ciągłym zwiększaniu ich stromości narastania. W praktyce często wyznacza się tzw. rozkład pseudo-początkowy, który powstaje w uzwojeniu w chwili przechodzenia udaru przez jego wartość szczytową i jest znacznie prostszy do wyznaczenia. W przypadku znormalizowanego udaru napięciowego piorunowego, rozkład pseudo-początkowy wyznacza się zazwyczaj dla chwili  $t=1,2 \mu\text{s}$ , ale można spotkać też sytuację wyznaczania tego rozkładu dla wcześniejszych chwil czasu, jeśli rozkład po czasie  $t=1,2 \mu\text{s}$  nie jest już pojemnościowy, lub jest zaburzony przez oscylacje wysokoczęstotliwościowe. W przypadku rozkładów pseudo-początkowych, ich początkowa stromość i nieliniowość jest zazwyczaj mniejsza niż czysto pojemnościowych rozkładów początkowych obliczonych komputerowo.

W przypadku oddziaływania przepięć szybkozmiennych na uzwojenie transformatora, analiza rozkładu początkowego, lub pseudo-początkowego, jest źródłem wielu użytecznych informacji. Do analizy tego stanu można posługiwać się analogią do rozkładu pola elektrostatycznego, uzależnionego od układu pojemności wzdłużnych i poprzecznych (wpływ indukcyjności jest nieistotny w początkowej chwili oddziaływania udaru napięciowego).

Rozkład początkowy i pseudo-początkowy napięcia w dużej mierze determinuje maksymalne wartości przebiegów przepięciowych o znacznych stromościach, występujących w uzwojeniach. W celu lepszego wyjaśnienia pojęcia początkowego rozkładu napięcia

rozważmy uproszczony schemat uzwojenia, zawierający jedynie pojemności szeregowe i równoległe (Rys. 5.12).

Oznaczmy przez  $C_z$  wypadkową pojemność stosu równoległych pojemności doziemnych wszystkich pierścieni (zwojów), a przez  $C_c$  – wypadkową pojemność wzdłużną (szeregowego połączenia pojemności pomiędzy poszczególnymi pierścieniami. Długość uzwojenia wzdłuż drutu nawojowego będzie traktowana jako jednostkowy odcinek  $l$ , a długość jednego zwoju jako element  $dx$ . Napięcie doziemne  $u_x$  na tym elemencie, powoduje zgromadzenie na jego pojemności  $C_z dx$  ładunku  $dq_x$ :

$$dq_x = u_x C_z dx \quad (5.16)$$

Ładunek  $q_x$  zgromadzony na pojemności wzdłużnej  $C_c/dx$ , przy napięciu  $du_x$  występującym pomiędzy jego sąsiednimi elementami, można określić zależnością:

$$q_x = \frac{C_c}{dx} du_x = C_c \frac{du_x}{dx} \quad (5.17)$$

Po przeprowadzeniu różniczkowania (15.17) i podstawieniu do (15.16) otrzymuje się zależność na rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia (5.18) oraz jego ogólne rozwiązanie (5.19):

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - \alpha^2 u_x = 0 \quad (5.18)$$

$$u_x = A e^{\alpha \frac{x}{l}} + B e^{-\alpha \frac{x}{l}} \quad (5.19)$$

gdzie:  $-\alpha = l \sqrt{C_z/C_c}$  (5.20)

-  $l$  – długość uzwojenia,

-  $x$  – odcinek jednostkowy uzwojenia.

Z przedstawionych zależności wynikają następujące rozkłady [72,105]:

- dla uzwojenia z końcem uziemionym:

$$u_x = U_0 \frac{\sinh \alpha \frac{l-x}{l}}{\cosh \alpha} \quad (5.21)$$

- dla uzwojenia z końcem izolowanym:

$$u_x = U_0 \frac{\cosh \alpha \frac{l-x}{l}}{\cosh \alpha} \quad (5.22)$$

gdzie: -  $U_0$  – wartość napięcia na uzwojeniu (Rys. 5.13).

Początkowe rozkłady napięcia (5.21) i (5.22) w uzwojeniu ściśle zależą od wartości współczynnika  $\alpha$ , czyli od stosunku wypadkowej pojemności doziemnej i wzdłużnej uzwojenia, a zatem od geometrii przestrzennej uzwojenia. Przy parametrze  $\alpha \approx 0$  oba rozkłady istotnie się różnią, natomiast dla  $\alpha > 3$  obie zależności można wyrazić wspólnym równaniem (5.23) [72,105,207]:

$$u_x = U_0 e^{-\alpha \frac{x}{l}} = f\left(\frac{C_z}{C_c}\right) \quad (5.23)$$

Na Rys. 5.17 przedstawiono wpływ wartości współczynnika  $\alpha$  na rozkład napięcia w uzwojeniu z końcem uziemionym. Skala napięcia na wykresie jest znormalizowana do wartości szczytowej fali przepięciowej docierającej do uzwojenia. W rzeczywistości, bardzo trudno o uzwojenia o współczynniku  $\alpha$  w przedziale 0 do 2, dlatego na rozkład początkowy praktycznie nie ma wpływu to czy koniec uzwojenia jest uziemiony czy izolowany.

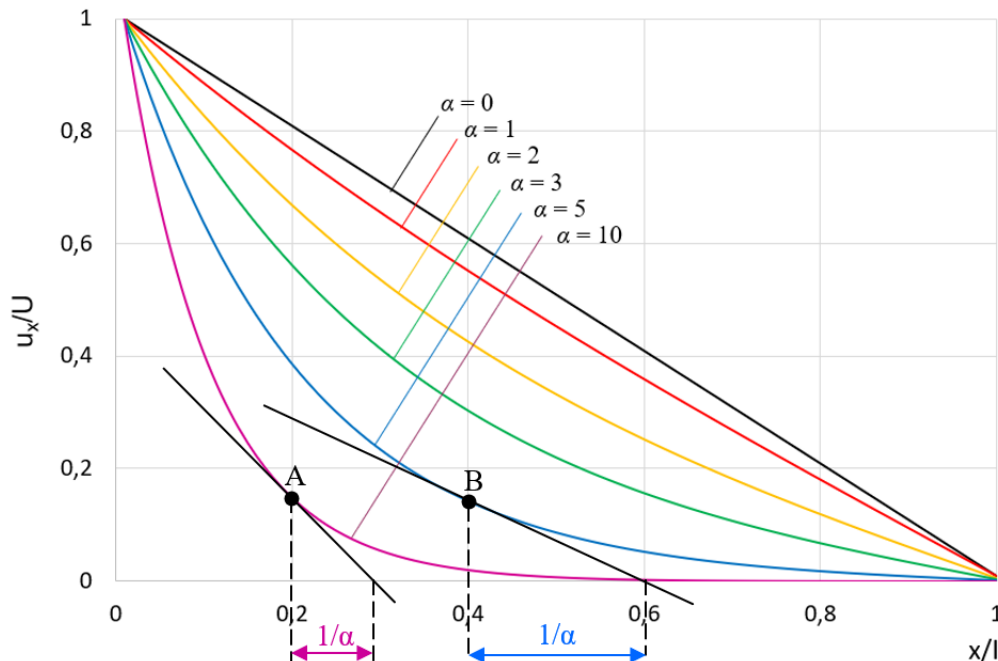
Parametr  $\alpha$  można w łatwy i wygodny sposób wyznaczyć w sposób graficzny, korzystając z interpretacji geometrycznej zależności (5.23). Odwrotność parametru  $\alpha$  jest podstyczną początkowego rozkładu napięcia w dowolnym jego punkcie (Rys. 5.17). Jest to prawdziwe dla uzwojeń o jednorodnej budowie. W celu wyznaczenia przybliżonej wartości  $\alpha$ , można posłużyć się uproszczoną metodą (tzw. metoda Norrisa), w której na krzywej rozkładu początkowego wyznacza się punkt o wartości  $u_x/U_0=0,37$  i odwrotność parametru  $\alpha$  stanowi odległość tego punktu od początku uzwojenia ( $1-x$  lub  $x/l$ ) [96,105].

W analizie przebiegów udarowych w uzwojeniach transformatorów korzysta się często z pojęcia gradientu  $g_x$  (5.24), który jest miarą napięcia  $du_x$  na krótkim odcinku uzwojenia  $l_u dx$ , np. napięcia międzycewkowego. Największa wartość gradientu  $g_{max}$  występuje na początku uzwojenia, w pobliżu jego zacisku liniowego ( $x=0$ ) [105].

$$g_x = \frac{du_x}{d(xl_u)} = \frac{U\alpha}{l_u} e^{-\alpha \frac{x}{l}} \quad (5.24)$$

$$g_{max} = \frac{U\alpha}{l_u} \quad (5.25)$$

gdzie:  $l_u$  – długość rozwiniętego uzwojenia.



Rys. 5.17 Wpływ wartości współczynnika  $\alpha$  na rozkład początkowy napięcia oraz geometryczna metoda wyznaczania parametru  $\alpha$

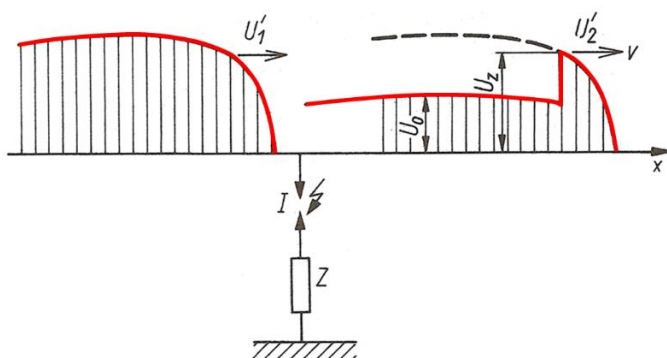
## 5.4.2 Metody ograniczania narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń

W celu ograniczenia negatywnych skutków przepięć na izolację transformatorów, w szczególności izolację uzwojeń, stosuje się różne środki techniczne mające na celu ograniczenie naprężeń elektrycznych i zapobieganie uszkodzeniom uzwojeń. Zalicza się do nich między innymi łagodzenie czoła fali udarowej, ograniczanie jej amplitudy, zmniejszenie różnicy pomiędzy rozkładem początkowym i końcowym napięcia w uzwojeniu (tzw. „prostowanie” rozkładu początkowego napięcia), wzmacnianie izolacji w obszarach najbardziej zagrożonych oraz uziemianie końca uzwojenia (jeśli jest możliwe) [72,78,105].

### - Łagodzenie amplitudy i stromości i fali udarowej

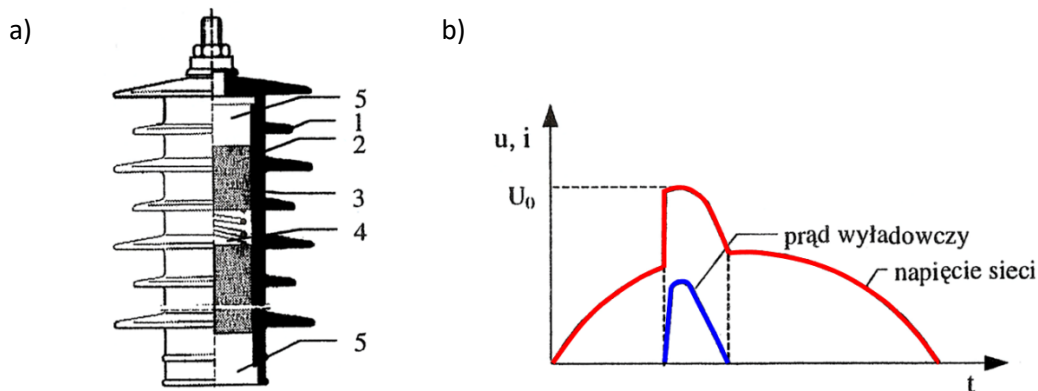
Aby ograniczyć amplitudę fali udarowej docierającej do transformatora, można zastosować ogranicznik przepięć przed transformatorem. Najprostszym elementem ograniczającym przepięcie jest iskiernik, czyli dwie elektrody z odstępem izolacyjnym pomiędzy nimi. Poziom ochrony iskiernika wynika z długości przerwy iskrowej. Zadziałanie iskiernika powoduje łukowe lub iskrowe zwarcie elektrod i dwustopniowe obniżenie napięcia – najpierw do wartości wywołującej zapłon  $U_z$ , później do napięcia obniżonego  $U_0$ , które wynika ze spadków napięć w przerwie iskrowej  $I$  oraz na impedancji  $Z$  obwodu iskiernika (Rys. 5.18) [82].

Iskierniki stanowią rezerwowy środek ochrony urządzeń przed przepięciami. Strome ucinanie fali przepięciowej przez iskiernik zwiększa bowiem zagrożenie zniszczenia izolacji uzwojeń, a brak zdolności gaszenia przez nie łuku elektrycznego przy przepływie prądów następczych może prowadzić do wyłączenia linii [72].



Rys. 5.18 Wpływ zapłonu iskiernika na zmianę napięcia;  $I$  – iskiernik,  $Z$  – impedancja obwodu iskiernika,  $U_1'$  – fala przepięciowa docierająca do iskiernika,  $U_2'$  – fala przepięciowa za iskiernikiem,  $U_z$  – napięcie zapłonu iskiernika,  $U_0$  – napięcie obniżone [82]

Obecnie do ochrony transformatorów przed przepięciami najczęściej stosowane są beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali (Rys. 5.19). Podstawowymi elementami tych ograniczników są warystory z materiału o silnie nieliniowej charakterystyce napięciowo- prądowej. Zasadniczą część objętości tego materiału stanowi tlenek cynku  $ZnO$ , a pozostałą tlenki innych metali (bizmutu, kobaltu, manganu, chromu itp.). Wcześniej stosowano również ograniczniki na bazie węgla krzemu  $SiC$  [72,82].



Rys. 5.19 Beziskiernikowy ogranicznik przepięć z tlenków metali (typ GZA):

a) przekrój ogranicznika, 1– osłona, 2– stos warystorów, 3– rura z włókna szklanego, 4– sprężyna, 5– elektrody, b) przebiegi napięć i prądów w działającym ograniczniku [72]

Ograniczniki beziskiernikowe posiadają prostą konstrukcję i dobre właściwości ochronne. Zapewniają jednoczesną ochronę izolacji od przepięć łączeniowych, piorunowych i dorywczych krótkotrwałych. Posiadają zdolność pochłaniania znacznych porcji energii i ciągłość charakterystyki napięciowo-prądowej (brak ząbka zapłonowego i charakterystyki zapłonowej). W praktyce, nie występuje w nich stan bezprądowy, ponieważ przy napięciu roboczym płyną w nich małe prądy upływu – rzędu mikro lub miliamperów, natomiast pojawienie się przepięcia powoduje płynne, ale gwałtowne przejście do przewodzenia dużych prądów udarowych [72,82]. Dzięki zastosowaniu ograniczników przepięć z tlenków metali możliwe jest:

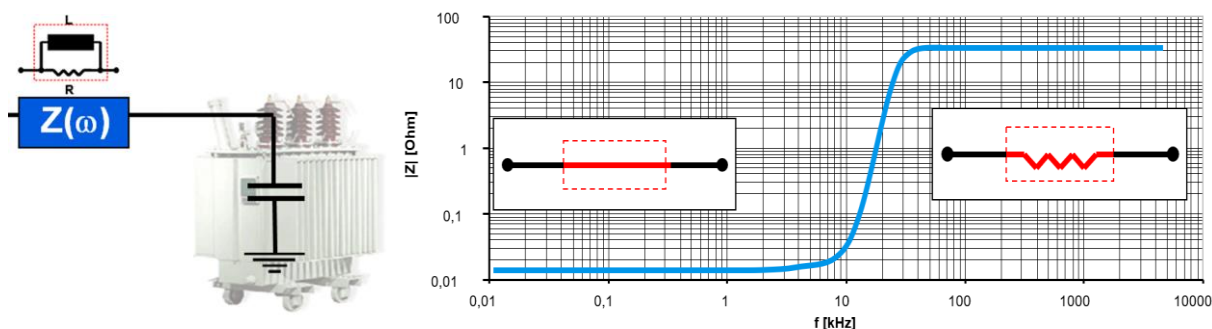
- zmniejszenie wymaganej wytrzymałości izolacji urządzeń w sieci i wynikającego z niej kosztu ich budowy,
- uproszczenie zabiegów eksploatacyjnych i zredukowanie kosztów ochrony przeciwprzepięciowej,
- zwiększenie niezawodności pracy sieci i zmodyfikowanie zasad koordynacji izolacji urządzeń sieciowych.

Beziskiernikowe i iskiernikowe ograniczniki przepięć są włączane jak najbliżej chronionych transformatorów, ponieważ ich odległość ma istotny wpływ na skuteczność ochrony izolacji, a wartości maksymalne przepięć na chronionym transformatorze rosną wraz ze wzrostem tej odległości [72,82,85].

Ograniczniki przepięć ograniczają wartość szczytową udaru docierającego do uzwojenia transformatora, ale nie redukują jego stromości  $dU/dt$ , nie filtrują składowych wysokoczęstotliwościowych i nie eliminują odbić fali [173].

W celu złagodzenia stromości fali udarowej docierającej do uzwojenia transformatora, można zastosować rozwiązanie opracowane przez firmę ABB, w postaci szeregowego dławika tłumiącego włączonego przed chronionym transformatorem. Pierwowzorem takiego rozwiązania był układ dławikowy prof. S. Szpora składający się z dławika szeregowego o indukcyjności 1 mH, iskiernika i odgromnika zaworowego [71,114]. Szeregowy dławik wg rozwiązania ABB, tworzy filtr dolnoprzepustowy z pojemnością własną transformatora,

a odpowiednia charakterystyka impedancyjno-częstotliwościowa sprawia, że urządzenie jest praktycznie niewidoczne przy napięciu o częstotliwości sieciowej 50 Hz, natomiast skutecznie tłumi składowe o wysokich częstotliwościach występujące w czasie oddziaływania przebieg [172,173,174]. Koncepcja zastosowania szeregowego dławika i charakterystyka  $Z=f(f)$  zostały przedstawione na Rys. 5.20.



Rys. 5.20 Koncepcja szeregowego dławika ograniczającego przebieg oraz jego charakterystyka impedancyjno-częstotliwościowa [173]

Koncepcja dławika tłumiącego (nazwa handlowa *SmartChoke*) została wdrożona w transformatorach rozdzielczych produkowanych przez ABB (obecnie Hitachi Energy) zapewniając znaczącą poprawę odporności na stromość narastania napięcia  $dU/dt$  i umożliwiając spełnienie wymagających norm. W rozwiązaniu zaproponowanym przez ABB, dławik i rezystor są zintegrowane z przepustem transformatora, zatem filtrowanie i tłumienie przebiegu napięciowego następuje bezpośrednio przed zaciskami wejściowymi uzwojenia [172,174]. Transformator wyposażony w przepust *SmartChoke* został certyfikowany zgodnie ze standardem SFS 2646 [198] w laboratorium HV Politechniki Helsińskiej w Espoo w Finlandii.

## - Zmniejszenie nieliniowości początkowego rozkładu napięcia

Rozkład początkowy napięcia wzdłuż uzwojenia można poprawić na drodze konstrukcyjnej przez zwiększenie pojemności szeregowej uzwojenia, bądź zmniejszenie jego pojemności doziemnej [105,111,112,154].

W klasycznych uzwojeniach o konstrukcji cewkowej (wywrotkowej), początkowy rozkład napięcia można poprawić przez zastosowanie odpowiednich wymiarów cewek (zapewniając odpowiedni stosunek wysokości do szerokości) – uzwojenia „krępe” cechują się lepszym parametrem  $\alpha$  niż uzwojenia „smukłe” [105]. Niemniej jednak, ze względu na wymagania techniczno-ekonomiczne (napięcie zwarcia, chłodzenie, materiałochłonność), poprawienie tego rozkładu jedynie przez zmianę wymiarów jest praktycznie niemożliwe i należy stosować w tym celu inne metody, jak: przeplatanie zwojów w cewkach [105,117,208,228], wplatanie zwojów ekranujących pomiędzy zwoje robocze uzwojenia [95,137,230], stosowanie ekranów elektrostatycznych [95,105]. Metody te bazują na koncepcji konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregowej uzwojenia, w celu ograniczenia wartości maksymalnych przebieg wewnętrznych. Wpływ zastosowania powyższych rozwiązań na ograniczenie wartości maksymalnych przebieg w uzwojeniach jest dobrze zbadany i szeroko

opisany w literaturze, np. [33,78,89,95,105,117,137,139,164,182,204,208,214,219,228]. Zasadę przeplatania zwojów w cewkach, stosowania zwojów ekranujących, jak również ekranowania uzwojeń przedstawiono szerzej w rozdziale 4 niniejszej pracy.

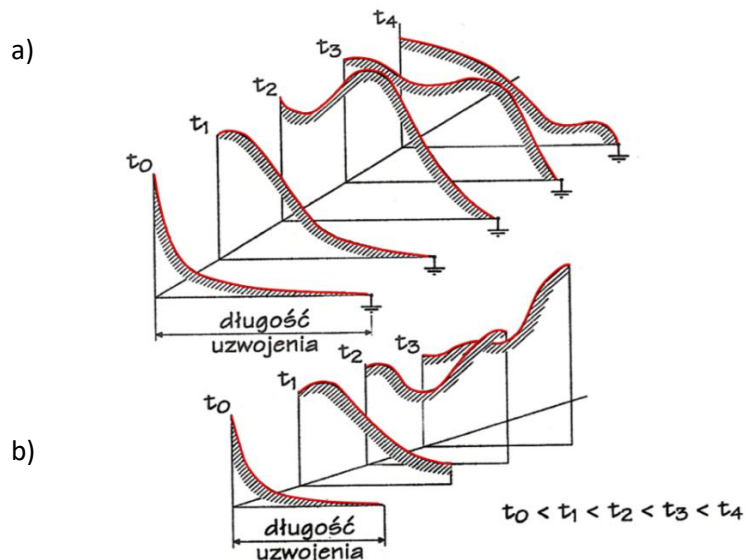
W uzwojeniach warstwowych, do poprawy początkowego rozkładu napięcia stosuje się specjalne ekrany elektrostatyczne, które otaczają uzwojenie od strony wewnętrznej oraz zewnętrznej. Jeden z ekranów podłączony jest do zacisku liniowego transformatora, natomiast drugi do uziemionego punktu gwiazdowego. Obecnie, uzwojenia tego typu stosuje się przeważnie w transformatorach rozdzielczych oraz transformatorach małych mocy o napięciu znamionowym do 72,5 kV [7,8,10,33,105].

W uzwojeniach cewkowych również można zastosować ekrany elektrostatyczne kompensujące wpływ pojemności doziemnych uzwojenia, ale w tym przypadku, ze względu na ograniczenia wymiarowe, należy stosować ekrany niepełne, które obejmują jedynie fragmenty uzwojenia znajdujące się poza oknem rdzenia. Dodatkowo, ekran powinien się oddalać od uzwojenia wraz z oddalaniem się od zacisku wejściowego. Z tych względów, jest to rozwiązanie niepraktyczne i nieopłacalne. Więcej informacji na temat stosowania ekranów elektrostatycznych w uzwojeniach cewkowych wysokiego napięcia można znaleźć w pracach [14,105,195,236].

W niektórych przypadkach, szczególnie jeśli z pewnych względów nie można zastosować innych metod ograniczających przepięcia w uzwojeniu lub są one niewystarczające, równoległe do uzwojenia (wewnątrz kadzi) można dołączyć w kilku punktach warystorowe ograniczniki przepięć, tworząc rezystorowy dzielnik napięcia, który wymusi znacznie bardziej równomierny rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia [91]. Nie jest to rozwiązanie popularne, ale było stosowane czasem do zabezpieczenia uzwojeń regulacyjnych oraz uzwojeń szeregowych autotransformatorów [17,105,144]. Beziskiernikowe ograniczniki przepięć są włączane pomiędzy wybranymi punktami uzwojeń w celu zmniejszenia w nich lokalnych przepięć. Przed zastosowaniem ograniczników wewnątrz kadzi prowadzone były badania, które miały na celu ocenę wpływu oleju transformatorowego na stabilność charakterystyk napięciowo-prądowych oraz sprawdzenie ich odporności na oddziaływanie pola magnetycznego i drgań [82,105,160,168]. Prowadzone są również prace nad oceną stopnia starzenia ograniczników przepięć oraz wpływu temperatury na ich charakterystyki i parametry [168,201].

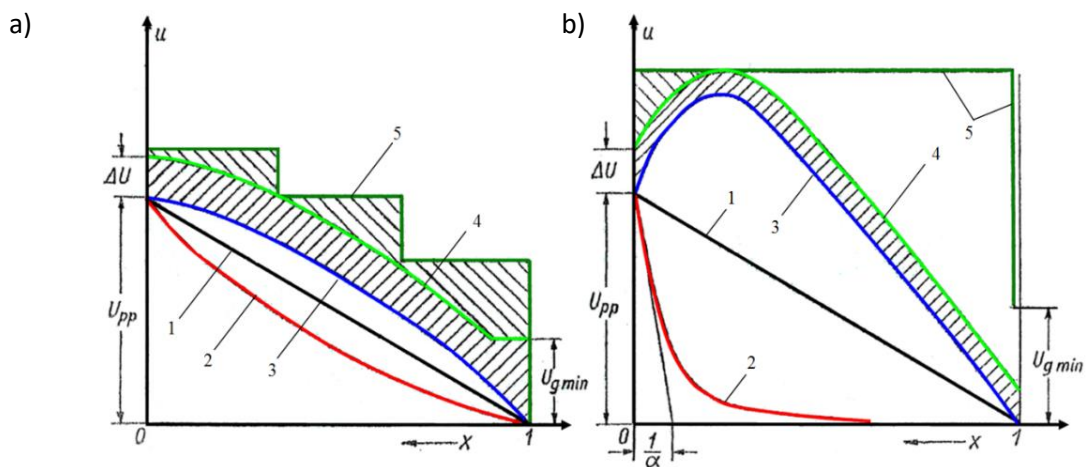
## **- Wzmacnianie i stopniowanie izolacji**

W czasie oddziaływania napięcia udarowego na uzwojenie, izolacja w różnych jego fragmentach jest naprężana elektrycznie w różnym stopniu. Powodem tego jest nieliniowy początkowy rozkład napięcia i wynikające z niego drgania wyrównawcze propagujące w głąb uzwojenia. Na Rys. 5.21 przedstawiono chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia w czasie oddziaływania napięcia udarowego. Wynika z nich, że w niektórych punktach uzwojenia występują przepięcia większe, niż na zacisku wejściowym transformatora. Powoduje to konieczność wzmacniania izolacji tych fragmentów uzwojenia przez poszerzenie kanałów międzycewkowych i zwiększenie grubości izolacji zwojów. Dodatkowo wartości maksymalne przepięć występują nierównocześnie w różnych obszarach uzwojenia [84,105].



Rys. 5.21 Chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia z punktem gwiazdowym:  
a) uziemionym, b) izolowanym [84]

Bezpośrednie uziemienie punktu neutralnego daje możliwość stopniowania izolacji głównej, czyli zmniejszania jej wytrzymałości w miarę oddalania się od zacisku liniowego. Koncepcja stopniowania izolacji została przedstawiona na Rys. 5.22. Przedstawione wykresy dotyczą transformatorów o współczynniku  $\alpha=2$  (transformator praktycznie niedrgający) oraz  $\alpha=10$  (transformator silnie drgający) [105].



Rys. 5.22 Koncepcja stopniowania izolacji: a) transformatora praktycznie niedrgającego, b) transformatora silnie drgającego, 1 – rozkład końcowy, 2 – rozkład początkowy, 3 – obwiednia przepięć, 4 – postulowana wytrzymałość izolacji głównej i zapas bezpieczeństwa  $\Delta U$ , 5 – schodkowa realizacja stopniowania wytrzymałości izolacji głównej [105]

Stopniowanie izolacji jest powodem komplikacji prób wytrzymałości elektrycznej. Probiercze napięcie przemiennie musi być przystosowane do izolacji najsłabszego punktu, czyli do izolacji punktu neutralnego. Przede wszystkim należy rozpatrzyć, jaką minimalną izolację powinien mieć punkt gwiazdowy przeznaczony do bezpośredniego uziemienia. Więcej szczegółów na temat stopniowania izolacji znajduje się w pracy [105].



## 6 Metody modelowania i obliczania stanów przejściowych w transformatorach

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd literatury dotyczącej różnych metod modelowania i obliczania transformatorów w stanach przejściowych. Wskazano literaturę źródłową, w której można znaleźć szczegółowy opis poszczególnych metod wspomnianych w rozdziale. Główny nacisk położono na metody służące do obliczania przebiegów wewnętrznych w transformatorze.

### 6.1 Analiza stanu techniki

Uzwojenia transformatorów i maszyn elektrycznych są skomplikowanymi elementami obwodów elektrycznych. W zależności od rozpatrywanego problemu należy je traktować w różny sposób: jako pojemność skupioną, indukcyjność skupioną, jako oporność falową, lub jako obwód drgający. Każda z wymienionych interpretacji jest możliwa do przyjęcia tylko w pewnym zakresie, a stworzenie ogólnej teorii sprawia ogromne trudności ze względu na różnorodność budowy uzwojeń oraz wpływ nieliniowego rdzenia ferromagnetycznego na parametry obwodu [86,96,105].

Rozwój metod obliczania i modelowania transformatorów w różnych stanach pracy był siłą napędową rozwoju technologii transformatorowej w ostatnich dekadach. Wynikało to głównie z dwóch względów. Producenci transformatorów potrzebowali narzędzi i modeli do projektowania niedrogich i niezawodnych transformatorów, a użytkownicy (zakłady energetyczne, operatorzy sieci energetycznych) potrzebowali modeli umożliwiających badanie interakcji transformatorów z pozostałymi elementami infrastruktury sieciowej, w celu analizy np. skutków zwarć, koordynacji izolacji, czy też obliczania napięć i prądów na zaciskach transformatora. Z tego względu rozwój metod obliczania transformatorów był prowadzony dwutorowo i obecnie można wyróżnić dwa podstawowe podejścia do obliczania transformatorów w stanach przejściowych, służące do różnych celów.

Pierwsze z nich to modele zaciskowe, opisujące zależności prądowo-napięciowe na zaciskach transformatora. To podejście jest stosowane głównie do przedstawiania transformatora jako elementu większej sieci i bazuje najczęściej na pomiarach transformatora w dziedzinie czasu i częstotliwości. Można je również zastosować do obliczania napięć na zaciskach wejściowych transformatora, które są źródłem przepięć wewnętrznych [78,89,100,215].

Druga metoda to modelowanie uzwojeń umożliwiające obliczanie napięć i prądów w określonych fragmentach uzwojenia i wyznaczenie rozkładu przepięć wewnętrznych. Stosowana jest ona najczęściej do analizy stanów przejściowych (np. rozkładów napięć udarowych) w uzwojeniach, w celach poprawnego zaprojektowania ich układu izolacyjnego. Warto zaznaczyć, że druga metoda może zostać przekształcona w metodę pierwszą.

W ostatnich latach, modele transformatorów są również stosowane do analizy czułości metody *FRA* (*Frequency Response Analysis*) jako metody diagnostycznej transformatorów [3,29,37,78,215].

Ze względu na wspomniane wyżej różnice w modelach i ich zastosowaniach, wybór odpowiedniego podejścia obliczeniowego jest podyktowany celem, w jakim te obliczenia mają być prowadzone. Przykładowo, różne metody obliczeniowe mogą być zastosowane do:

- analizy rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu na etapie jego projektowania i koordynowania poziomów izolacji wewnętrznej (jest to następnie weryfikowane w czasie prób transformatora), np. [62,143,166,231],
- analizy pomiarów i propagacji sygnałów wyładowań niezupełnych w uzwojeniu, np. [16,64,233],
- analizy przepięć piorunowych i łączeniowych w sieciach elektroenergetycznych i na zaciskach transformatora, np. [61,82,147,169],
- obliczania przepięć rezonansowych w transformatorach np. podczas operacji łączeniowych (kiedy częstotliwość fali przepięciowej pokrywa się z częstotliwością rezonansową transformatora), np. [12,78,93,120,183,206],
- analizy przepięć przenoszonych przez transformatory, np. [11,120,135,159],
- analizy odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia *FRA* jako metody diagnostycznej, np. [1,2,3,28,37,75,78,197,245,246].

Przy napięciu przemiennym o częstotliwości sieciowej (50, 60 Hz), transformator jest najczęściej reprezentowany za pomocą klasycznego schematu zastępczego zawierającego rezystancje i reaktancje rozproszenia uzwojenia pierwotnego i wtórnego, reaktancję magnesującą oraz rezystancję reprezentującą straty cieplne w rdzeniu. Taki rodzaj reprezentowania transformatora jest najczęściej używany do opisu charakterystyki (prądy i napięcia) transformatora podłączonego do sieci energetycznej. To podejście można zastosować do analizy stanów ustalonych w transformatorach, nie nadaje się natomiast do analizy transformatora poddanego działaniu przebiegów przejściowych, lub wysokoczęstotliwościowych [89,105].

Modele zaciskowe transformatorów („*black box*”) bazujące na badaniu odpowiedzi częstotliwościowej transformatora są stosowane do badań transformatorów metodą *FRA* (*Frequency Response Analysis*) [254], analizy napięć przenoszonych przez transformatory i jego interakcji z innymi elementami systemu elektroenergetycznego [77,78,120,205]. Tego typu modele powstają poprzez pomiar odpowiedzi częstotliwościowej macierzy admitancyjnej transformatora w szerokim zakresie częstotliwości (zazwyczaj 10 Hz – 1 MHz) i dopasowywanie jej elementów za pomocą funkcji wymiernych. Najpopularniejszą metodą określenia funkcji przejścia transformatora jest algorytm dopasowania wektorowego na podstawie zmierzonych charakterystyk częstotliwościowych, jak przedstawiono w [3] i [218]. Otrzymane funkcje przejścia są zazwyczaj reprezentowane przez schematy zastępcze z elementami *RLCG*, które można łatwo zaimplementować w oprogramowaniu symulacyjnym do analizy stanów przejściowych (np. *ATP-EMTP*), jak np. w [99]. Metoda analizy modalnej Wilcox’a uwzględnia rezonanse na zaciskach transformatora, jako mody dopasowane do określonych funkcji przenoszenia, które są implementowane w pakietach takich

jak *EMTP* (lub podobnych) przy użyciu wspomnianej wcześniej techniki. Jednakże, parametry *RLCG* nie odzwierciedlają rozproszonej pojemności i indukcyjności uzwojeń, dlatego te metody nie nadają się do opisu zjawisk przejściowych wewnątrz uzwojeń transformatora [3].

Istotnymi zagadnieniami w czasie rozwoju modeli transformatora do analiz stanów przejściowych były tematy związane z modelowaniem nieliniowości rdzenia oraz uwzględnieniem wpływu prądów wirowych w rdzeniu i uzwojeniach, co zostało szeroko opisane w [1,3,22,58,59]. Z wykorzystaniem modeli opracowanych w wymienionej literaturze, można obliczać charakterystyki na zaciskach transformatora zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości oraz integrować je w sieć z innymi komponentami w celu symulacji stanów nieustalonych.

Ze względu na fakt, że udary szybkozmiennie wzbudzają w uzwojeniach przebiegi o wyższych częstotliwościach (powodując silne oscylacje napięcia), należy analizować rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia, co wymaga stosowania modeli dyskretnych, jak np. w [123]. Najbardziej popularny w modelowaniu i analizowaniu odpowiedzi uzwojeń na pojawiające się stany nieustalone w postaci przepięć jest model drabinkowy uzwojenia, pełny lub uproszczony (Rys. 5.10, Rys. 5.11). Model taki buduje się łącząc ze sobą elementy pojemnościowe i indukcyjne reprezentujące parametry zastępcze sekcji uzwojenia. Wpływ rezystancji i konduktancji można zazwyczaj pominąć w szczegółowych analizach i uwzględnić go przez zastosowanie współczynnika tłumienia, jak wykazano np. w [92]. W zależności od wymaganej dokładności, sekcja może obejmować jeden lub kilka zwojów, cewkę lub kilka cewek, itp. Istotnym zagadnieniem w takiej analizie, jest obliczenie sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych. Sprzężenia pojemnościowe są ważne dla praktyki i równocześnie nie stanowią trudności obliczeniowych, natomiast zagadnienie sprzężeń magnetycznych i wpływu rdzenia o nieliniowych właściwościach, jest znacznie bardziej zawiłe, chociaż jego znaczenie dla praktycznych obliczeń jest mniejsze [96]. Modele drabinkowe uzwojenia mają zazwyczaj zastosowanie dla częstotliwości sięgających rzędu kilkuset kHz. Aby rozszerzyć ten zakres do kilku MHz, konieczne byłoby zastosowanie procedury modelowania na poziomie pojedynczych zwojów, zamiast na poziomie pojedynczych cewek. Takie podejście doprowadziłoby do bardzo rozbudowanego systemu, który byłby trudny do symulacji i analizy. Analizy przepięć w uzwojeniach, bazujące na modelach drabinkowych zawierających elementy *RLC*, wykonuje się często korzystając z pakietu *ATP-EMTP*, jak przykładowo w [47].

Parametry obwodu zastępczego oblicza się zazwyczaj stosując wzory analityczne na pojemności, indukcyjności czy rezystancje (przedstawione np. w [37,157]), albo oblicza się je symulacyjnie metodą elementów skończonych, na podstawie wcześniej zbudowanej geometrii uzwojenia, jak w [90,98,200,257]. Podejście analityczne dla uzwojeń o niejednorodnej budowie (np. z przeplataniem zwojów lub z elementami kształtującymi rozkład pola elektrycznego) jest zadaniem dość wymagającym, dlatego obecnie powszechnie stosuje się metody polowe.

Zbudowanie w pakietach symulacyjnych modelu zawierającego pasywne elementy o stałych parametrach, jest stosunkowo proste, natomiast już implementacja częstotliwościowych zależności poszczególnych elementów schematu zastępczego, jest żmudnym zadaniem. Z tego względu, często buduje się model obwodu w pakiecie *MATLAB* (jak w [122]), jako układ równań różniczkowych opisujących fizyczne zachowania obwodu,

a parametry reprezentuje jako macierze pojemności i indukcyjności własnych i wzajemnych, jak pokazano w [257].

Analityczne podejście do obliczania indukcyjności za pomocą komputerów przedstawiono w pracach [69,70,186]. To podejście zostało następnie ulepszone przez Wilcox'a i współautorów w [234,235] i wydaje się być jednym z najdokładniejszych podejść analitycznych do obliczania indukcyjności własnej i wzajemnej uzwojenia, z uwzględnieniem charakterystyk częstotliwościowych rdzenia. Rdzeń jest traktowany jako „lity” element o anizotropowej przenikalności, a laminacje są symulowane przez jego anizotropową rezystywność – szeroko tą tematyką zajmował się N. Abeywickrama (np. prace [1,2,3]).

Transformatory energetyczne większych mocy są często połączone ze stacjami elektroenergetycznymi w izolacji gazowej (*GIS - Gas Insulated Substation*). Współpraca transformatora z układami *GIS*, może być związana z generowaniem bardzo szybkich przebiegów przejściowych (tzw. *VFTO - Very Fast Transient Overvoltages*), powodujących powstanie fal biegnących i oscylacji napięcia rzędu kilku MHz wewnątrz uzwojeń. Konwencjonalne, dyskretne modele nie są wystarczająco precyzyjne do analizy tych zjawisk, ponieważ długość fali przy tak wysokich częstotliwościach, może być mniejsza niż wymiary geometryczne uzwojenia [3,26,68,199,244]. Dlatego też, do tego typu analiz stosuje się często teorię jedno oraz wielotorowej linii przesyłowej (*STL, MTL - Single and Multiconductor Transmission Line theory*), jak przedstawiono np. w [3,53,78,93,181,215]. W tym podejściu uzwojenie jest traktowane jako wielotorowa linia długa. Takie podejście ma zastosowanie przede wszystkim do analizy uzwojeń o jednorodnej budowie, jednakże łącząc model jedno- i wielotorowej linii można ominąć to ograniczenie, jak wykazano w [180]. Model jednorodny służy wtedy do odwzorowania elementarnych części uzwojenia (np. cewek), a model wielotorowy opisuje interakcje pomiędzy nimi. Metoda *MTL* znajduje zastosowanie w metodzie *FRA* (np. [245]), w analizowaniu zachowania transformatora w czasie oddziaływania szybkich i bardzo szybkich przebiegów przejściowych (np. [199]) oraz w badaniu propagacji sygnałów wyładowań niezupełnych w uzwojeniu, jak w [104].

Metoda badania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia *FRA*, przyjęła się dość powszechnie jako narzędzie diagnostyczne do oceny stanu uzwojeń, a w szczególności ich mechanicznej „integralności” (zmiana geometrii uzwojenia jest odzwierciedlona w zmianie jego charakterystyki częstotliwościowej). Interpretację wyników pomiarów *FRA* można poprawić poprzez wprowadzenie precyzyjnego modelowania zachowania uzwojeń transformatora w zakresie wysokich częstotliwości. Modelowanie wysokoczęstotliwościowe stanowi odrębne, bardzo ważne zagadnienie i było, oraz nadal jest, przedmiotem wielu prac i analiz, jak np. [3,37,55,78,120,215]. Dokładne modelowanie uzwojeń w zakresie wysokich częstotliwości może pomóc w identyfikacji istotnych cech odpowiedzi uzwojeń na powstałe uszkodzenia czy defekty, w tym wpływu lokalnych zwarć na parametry obwodu. Wymaga to jednak opracowania szczegółowych modeli uzwojeń, a próby wykorzystania tego podejścia z obwodami o parametrach skupionych przedstawiono między innymi w [80,187,188]. Powszechnie przyjmuje się założenie, że wpływ rdzenia przy częstotliwościach powyżej 10 kHz można pominąć w obliczeniach indukcyjności uzwojeń, oraz że powierzchnia rdzenia jest ekwipotencjalna przy obliczaniu pojemności uzwojeń [27,225]. Jednakże w [3] i [234] wykazano, że efekt rdzenia nie jest całkowicie pomijalny, a tłumienie przy wyższych

częstotliwościach jest głównie spowodowane prądami wirowymi w rdzeniu. Analizowane są również możliwości wykorzystania do analizy *FRA* sygnałów o różnych kształtach i częstotliwościach oraz oceniana jest ich praktyczna przydatność [119].

Wykorzystanie metody elementów skończonych (*MES* lub ang. *FEM – Finite Element Method*) do analizy przepięć w uzwojeniach transformatorów nie należy rozważać jako osobnej metody, ale raczej jako skuteczne i wygodne narzędzie wspomagające do obliczania parametrów zastępczych (macierzy pojemności, indukcyjności) potrzebnych jako dane wejściowe do wcześniej opisanych metod. Metody polowe są stosowane również w celu określenia wpływu zjawisk występujących w uzwojeniach i rdzeniach (np. zjawisko zbliżenia, efekt naskórkowy), na zmianę ich parametrów wykorzystywanych do analiz stanów przejściowych i odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia [25,90,216,224].

Na etapie projektowania transformatorów oraz opracowywania nowych, lepszych koncepcji uzwojeń, metoda elementów skończonych jest wykorzystywana powszechnie do obliczenia rozkładów pól elektrycznych, magnetycznych lub cieplnych w uzwojeniach, rdzeniach, czy też elementach konstrukcyjnych. Wyniki tych obliczeń są następnie wykorzystywane np. do wymiarowania izolacji, projektowania kanałów olejowych, itp. Takie analizy przedstawiono m.in. w [37,122,145,200,227].

Metoda polowa obecnie nie jest stosowana bezpośrednio do symulacji stanów przejściowych (przebiegowych) w transformatorach ze względu na wymaganą ogromną moc obliczeniową komputerów (szczególnie w przypadku obliczeń w przestrzeni 3D) oraz złożoność obliczeń, chociaż podejmowane były takie próby. Przy obecnych mocach obliczeniowych komputerów, takie analizy wiązałyby się z zastosowaniem daleko idących uproszczeń. Metody polowe są wykorzystywane powszechnie do wspomagania obliczeń transformatorów w stanach przejściowych, wykonywanych innymi technikami. Przykłady zastosowania metod polowych do wspomagania obliczeń zjawisk przebiegowych w uzwojeniach można znaleźć w pracach [3,36,37,200,227,257].

W ostatnich latach często korzysta się z obliczeń metodą polowo-obwodową polegającą na rozwiązywaniu równań Maxwella w obszarze analizowanego obiektu przy równoczesnym uwzględnieniu równań obwodowych układu, w którym dany obiekt pracuje (np. uwzględniając warunki obciążenia dołączonego do zacisków obiektu). Takie podejście rozszerza możliwości klasycznej analizy polowej oraz obwodowej, rozważanych osobno i umożliwia badanie interakcji obiektu z zewnętrznym systemem, w którym pracuje [121].

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że obecnie istnieje wiele metod oraz narzędzi obliczeniowych do analizy stanów przejściowych w transformatorach. Niemniej jednak żadna z tych metod nie jest uniwersalna, każda z nich posiada pewne ograniczenia co do zakresu stosowalności, rodzaju uwzględnianych zjawisk fizycznych, zakresu częstotliwości itp. Zastosowanie poszczególnych metod, zawsze wiąże się z wprowadzaniem pewnych założeń upraszczających. W celu kompleksowego obliczenia zjawisk przebiegowych w uzwojeniach oraz interakcji transformatora z innymi elementami infrastruktury elektroenergetycznej w czasie oddziaływania przebiegu (uwzględniając propagację przebiegu w liniach przesyłowych, czy dystrybucyjnych), należy zastosować minimum dwie metody – jedną do wyznaczenia napięć pojawiających się na wejściu transformatora, a drugą do

obliczenia propagacji tego napięcia wewnątrz uzwojeń i oceny narażeń układu izolacyjnego. Zasadne jest zatem kontynuowanie rozwoju istniejących metod obliczeniowych oraz opracowywanie nowych metod w celu dokładniejszego odwzorowania rzeczywistych zjawisk przepięciowych narażających układy izolacyjne wewnętrzne i zewnętrzne transformatorów.

## 6.2 Zastosowanie metody polowej do wspomaganie analizy stanów przejściowych w transformatorach energetycznych

W niniejszej pracy doktorskiej do rozszerzenia analiz narażeń uzwojeń transformatorów energetycznych od przepięć szybkozmiennych wykorzystano metodę polową. Opracowano modele symulacyjne uzwojenia o konstrukcji warstwowej oraz cewkowej i przeprowadzono obliczenia rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w różnych topologiach tych uzwojeń. W początkowej chwili oddziaływania napięcia udarowego na transformator, w celu określenia rozkładu napięcia w uzwojeniu można posługiwać się analogią do pola elektrostatycznego i uwzględniać tylko zjawiska pojemnościowe, a sprzężenia indukcyjne pominąć, jak wyjaśniono w rozdziale 5.

Symulacje przeprowadzone zostały w środowisku *COMSOL Multiphysics* ver.5.6, moduł *AC/DC – Electrostatics*. *COMSOL Multiphysics* to pakiet symulacyjny rozwiązujący układy nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych (*MES* lub *FEM – Finite Element Method*). Obliczenia obejmują układy jedno, dwu oraz trójwymiarowe. Pakiet ten jest powszechnie stosowany w jednostkach badawczych oraz akademickich, do obliczeń polowych w różnych dziedzinach nauki, np. elektrotechnice i elektronice, mechanice, chemii, fizyce itp.

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe prawa i równania elektrostatyki oraz scharakteryzowano podstawowe warunki brzegowe wykorzystywane w obliczeniach prowadzonych w ramach realizacji pracy doktorskiej.

Elektrostatyka jest poddziedziną elektromagnetyzmu zajmującą się opisem pola elektrycznego, wywołanego przez ładunki statyczne. Elektrostatyka charakteryzuje się niezmiennością wielkości elektrycznych w czasie ( $\partial/\partial t=0$ ) oraz brakiem występowania prądów elektrycznych ( $\mathbf{J}=0$ ). Podstawowe równania elektrostatyki (dla próżni) są następujące [49]:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (6.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (6.2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (6.3)$$

gdzie: -  $\mathbf{E}$  – wektor natężenia pola elektrycznego,

-  $\mathbf{D}$  – wektor indukcji elektrycznej,

-  $\rho$  – gęstość ładunku, -  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni.

Zależność (6.1) oznacza, że źródłem pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  jest ładunek elektryczny  $Q$  o gęstości  $\rho$ . Dodatkowym warunkiem w elektrostatyce jest zależność (6.2) oznaczająca

bezwirowość pola elektrycznego  $\mathbf{E}$ . Siła  $\mathbf{F}$  działająca na ładunek  $Q$  znajdujący się w polu elektrostatycznym o natężeniu  $\mathbf{E}$  określa zależność (6.4):

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E} \quad (6.4)$$

Dla bezwirowego pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  można wprowadzić elektryczny potencjał skalarny  $V$  definiowany jako:

$$-\nabla V = -\text{grad } V = \mathbf{E} \quad (6.5)$$

Zatem, pole elektrostatyczne można opisać jednym równaniem (6.6), wynikającym bezpośrednio z zależności (6.1) i (6.5):

$$-\nabla \cdot \nabla V = -\text{div grad } V = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (6.6)$$

Ograniczeniem powyższego równania jest brak możliwości opisywania materiałów dielektrycznych. W celu rozwiązania tego problemu, teorię tę rozszerza się o zjawisko polaryzacji dielektrycznej opisywane wektorem polaryzacji  $\mathbf{P}$ . Dielektryki znajdujące się w polu elektrycznym ulegają zjawisku polaryzacji (tworzeniu lub orientacji już istniejących dipoli elektrycznych w reakcji na przyłożone pole elektryczne) przez co wektor indukcji elektrycznej  $\mathbf{D}$  jest większy, niż przy jednakowym polu w próżni. W wyniku polaryzacji w dielektryku powstaje wewnętrzne pole elektryczne, które częściowo równoważy przyłożone zewnętrzne pole. Powoduje to, że pole elektryczne w dielektryku różni się od pola w próżni. W celu makroskopowego opisu tego zjawiska wprowadza się wektorowe pole polaryzacji  $\mathbf{P}$  oraz gęstość ładunku polaryzacji  $\rho_p$ , wyrażone jako:

$$\rho_p = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (6.7)$$

Zjawisko polaryzacji powoduje zmianę pola elektrycznego w dielektryku zgodnie z (6.8):

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho + \rho_p}{\epsilon_0} \quad (6.8)$$

Powyższą zależność można wyrazić również jako:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho \quad (6.9)$$

Zatem wektor indukcji elektrycznej  $\mathbf{D}$  w dielektrykach przyjmuje postać (6.10):

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (6.10)$$

Uwzględniając powyższe stwierdzenia oraz fakt, że pole elektryczne jest bezwirowe, równania elektrostatyki można wyrazić jedną zależnością (równanie Poissona) (6.11):

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V - \mathbf{P}) = \rho \quad (6.11)$$

Przyjmując, że materiał dielektryczny jest izotropowy i liniowy, pole wektora polaryzacji jest proporcjonalne do natężenia pola elektrycznego:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad (6.12)$$

gdzie:  $-\chi_e$  – podatność elektryczna (wielkość bezwymiarowa).

Uwzględniając zależność pomiędzy  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} (1 + \chi_e) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6.13)$$

gdzie: -  $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$  – przenikalność elektryczna względna dielektryka, (6.14)

$$- \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (6.15)$$

Uwzględniając powyższe, ogólne równanie elektrostatyki w liniowych materiałach można zapisać jako:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = \rho \quad \text{lub} \quad \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (6.16)$$

Analiza pól elektrycznych w układach izolacyjnych (np. transformatorów), zazwyczaj ogranicza się do pól stacjonarnych i quasi-stacjonarnych pochodzących od przyłożonych potencjałów. Zakłada się zatem brak ładunków elektrycznych (gęstość ładunku  $\rho=0$ ). W tej sytuacji, równanie opisujące pole w układach izolacyjnych transformatorów przyjmuje postać równania Laplace'a z warunkami brzegowymi Dirichleta (na powierzchniach elektrod muszą być zadane konkretne potencjały):

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6.17)$$

Powyższe równanie jest wykorzystywane do określania rozkładu potencjału i pola elektrostatycznego w materiałach dielektrycznych. Prawo Gaussa i Faradaya (dla elektrostatyki) określają następujące warunki dla składowej stycznej i normalnej pola na granicach materiałów:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \rho_s \quad (6.18)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \quad (6.19)$$

gdzie: -  $\rho_s$  – powierzchniowa gęstość ładunku.

Biorąc pod uwagę fakt, że uzwojenie transformatora składa się nie tylko z dielektrycznych, ale również przewodzących materiałów, w celu obliczenia rozkładu pola należy wprowadzić odpowiednie warunki brzegowe na granicach materiałów, szczególnie na brzegach określających granice materiałów przewodzących, które stanowią powierzchnie ekwipotencjalne. Charakterystyka podstawowych warunków brzegowych wykorzystywanych w symulacjach realizowanych w ramach przygotowywania niniejszej rozprawy doktorskiej przedstawiona jest w Tabeli 6.1.

Stosując metodę elementów skończonych do rozwiązywania określonych zagadnień inżynierskich, czy naukowych trzeba liczyć się z szeregiem uproszczeń, skutkujących błędami rozwiązania. Do błędów rozwiązania należy zaliczyć m.in. przybliżenia numeryczne, niedoskonałości w matematycznym opisie analizowanego zjawiska, pominięcie niektórych parametrów, niedokładne dane materiałowe, itp. [121].



Tabela 6.1 Charakterystyka warunków brzegowych wykorzystywanych w symulacjach numerycznych opisanych w rozdziale 7 i 8 niniejszej pracy [52]

<i>Electric potential</i>	$V = V_0$	<i>Potencjał elektryczny</i> - warunek brzegowy określający narzucony potencjał metalicznej elektrody znajdującej się na potencjale $V_0$ .
<i>Floating potential</i> oraz <i>Floating potential group</i>	$V = \text{const.}$ $\int_{\partial\Omega} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{n}) dS = Q_0$ $\partial\Omega$ – brzeg obszaru, $n$ – wektor normalny do powierzchni	<i>Pływający potencjał</i> – warunek brzegowy służący do modelowania metalicznej elektrody znajdującej się na pływającym potencjale wynikającym z rozkładu pola w modelu obliczeniowym. Warunek wprowadza stałą wartość potencjału $V$ na wszystkich granicach objętych danym warunkiem brzegowym.
<i>Ground</i>	$V = 0$	<i>Potencjał ziemi</i> - warunek brzegowy definiujący potencjał ziemi (0 V) na określonych granicach obszarów w modelu.

Metoda polowa obecnie nie jest stosowana bezpośrednio do symulacji stanów przejściowych (przebiegowych), ale może być zastosowana do wspomagania analiz prowadzonych innymi metodami – np. w celu koordynacji izolacji, wymiarowania układów izolacyjnych, itp. Połączenie metody polowej z metodą obwodową rozszerza możliwości istniejące w każdej z tych metod osobno. Metody polowe cały czas są rozwijane o nowe możliwości, narzędzia, dokładniejsze opisy zjawisk fizycznych, zatem ich zastosowanie w nauce i technice będzie się zwiększać.

## 7 Analiza przebiegów w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

Jednym z najistotniejszych zagrożeń izolacji transformatorów energetycznych jest oddziaływanie przebiegów różnego pochodzenia – atmosferyczne, łączeniowe, długotrwałe, itp. Ze względu na różnice w kształcie, wartościach maksymalnych oraz czasie oddziaływania poszczególnych rodzajów przebiegów, stanowią one różne zagrożenie dla izolacji transformatora. Przebiegi atmosferyczne stanowią szczególnie ważny problem eksploatacyjny ze względu na duże wartości maksymalne oraz stromości fali udarowej [82].

Zagrożenia przebiegiowe izolacji wewnętrznej oraz zewnętrznej transformatorów stanowią odrębne zagadnienia, ze względu na znaczne różnice w charakterze samych narażeń oraz w konstrukcji zewnętrznego oraz wewnętrznego układu izolacyjnego. Zagrożenie izolacji zewnętrznej wynika z kształtu, czasu oddziaływania i wartości maksymalnej przebiegu, jakie dociera do zacisków transformatora, natomiast przebiegi wewnątrz uzwojeń są uzależnione dodatkowo od reakcji uzwojenia na pojawiającą się falę udarową. Przebiegi wewnętrzne znacząco różnią się od tych na zaciskach transformatora ze względu na oddziaływanie pojemnościowych i indukcyjnych sprzężeń wewnątrz uzwojeń oraz zjawiska rezonansowe. Sprzężenia te wynikają ze sposobu wzajemnego ułożenia poszczególnych zwojów, cewek lub warstw i uzwojeń względem siebie oraz względem uziemionych części konstrukcyjnych, jak np. kadź czy rdzeń magnetyczny. Ze względu na złożony układ elektromagnetyczny jaki stanowią uzwojenia, narażenia w poszczególnych ich obszarach różnią się od siebie [7,78,82,95,105,215].

Każda zmiana w geometrii transformatora, jego wymiarach, sposobie ułożenia zwojów, czy zastosowanych materiałach, ma odzwierciedlenie w wartościach pojemności szeregowych oraz doziemnych uzwojenia. To z kolei prowadzi do bardziej lub mniej korzystnego rozkładu początkowego napięcia w uzwojeniu. Z tego względu, różne rodzaje uzwojeń zachowują się odmiennie przy doprowadzeniu stromej fali udarowej do ich zacisków [33,78,89,204,215].

W praktyce, powszechnie stosowanych jest kilka metod ograniczających narażenia izolacji uzwojeń transformatorów od przebiegów. Należą do nich: przeplatanie zwojów w cewkach, wplatanie specjalnych zwojów ekranujących oraz stosowanie ekranów elektrostatycznych. Dwie pierwsze metody są stosowane w uzwojeniach o konstrukcji cewkowej, natomiast trzecia odnosi się raczej do uzwojeń typu warstwowego. Niemniej jednak, znane są też konstrukcje transformatorów z uzwojeniami cewkowymi i dołączonym do nich ekranem elektrostatycznym. Wspomniane metody bazują na koncepcji konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregowej lub zmniejszenia pojemności doziemnej uzwojenia, w celu ograniczenia wartości maksymalnych przebiegów wewnętrznych [7,78,95,105,215]. W celu poprawienia odporności transformatora na przebiegi stosowane są również ograniczniki warystorowe włączane pomiędzy najbardziej narażone sekcje uzwojenia [17,91,144].

Znajomość charakteru i rozkładu szybkozmiennych przebiegów w uzwojeniach jest konieczna do prawidłowego zaprojektowania ich izolacji. Dlatego też prowadzone są prace

mające na celu określenie narażeń, jakim poddawana jest izolacja transformatora podczas oddziaływania przepięć atmosferycznych. Prace te obejmują zarówno badania eksperymentalne, prowadzone na rzeczywistych obiektach bądź specjalnie przygotowanych modelach, jak i obliczenia oraz symulacje komputerowe. Prace te dotyczą między innymi analizy rozkładów przepięć piorunowych w różnych konstrukcjach i topologiach uzwojeń transformatorów oraz wpływu zmian konstrukcyjnych na zmniejszenie zagrożeń przepięciowych izolacji transformatorów [78,95,215].

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę rozkładów przepięć piorunowych w eksperymentalnym uzwojeniu wielowarstwowym transformatora energetycznego. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań eksperymentalnych przepięć piorunowych w uzwojeniu oraz symulacji numerycznych rozkładów pola i potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu. Celem badań było przede wszystkim określenie wpływu ekranów, ich podłączenia, odłączenia oraz usunięcia z modelu uzwojenia, na przebiegi oraz wartości maksymalne przepięć wewnętrznych oraz rozkłady początkowe i pseudo-początkowe napięcia w uzwojeniu.

## 7.1 Obiekt badań

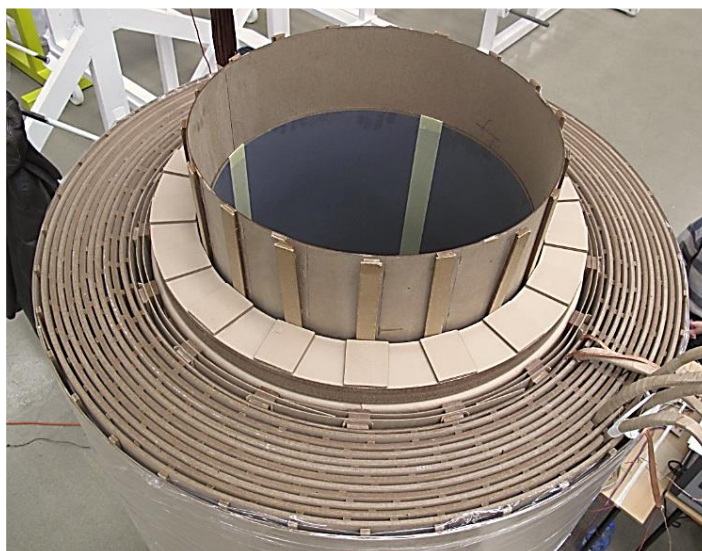
W Fabryce Transformatorów ABB w Łodzi (obecnie Hitachi Energy) zbudowany został pełnowymiarowy model uzwojenia jednej fazy transformatora energetycznego o mocy 63 MVA i przekładni znamionowej 147 kV / 10,5 kV. Głównym przeznaczeniem modelu, było dokładne zbadanie narażeń piorunowych w uzwojeniu o takiej konstrukcji oraz analiza wpływu różnych czynników na zmianę wielkości tych narażeń.

Badany obiekt zawierał uzwojenie wysokiego napięcia o konstrukcji wielowarstwowej oraz uzwojenie dolnego napięcia typu śrubowego, umieszczone wspólnie (Rys. 7.1). Uzwojenie wysokiego napięcia zawierało 11 warstw, każda o 92 zwojach i zostało nawinięte przewodem o ciągłej transpozycji żył (*CTŻ*) w izolacji papierowej. Warstwy uzwojenia zostały nawinięte naprzemiennie – w lewo, w prawo, itd. Poszczególne warstwy były oddzielone od siebie „kanałami olejowymi” o szerokościach odpowiednio: 5-4-4-3-3-3-3-3-3-3 mm, licząc od strony wewnętrznej. Warstwa wewnętrzna została oznaczona numerem 1 (pierwsza warstwa), natomiast zewnętrzna – numerem 11 (ostatnia warstwa). Przyjęto następujące oznaczenie zwojów w uzwojeniu: *nr\_warstwy-nr\_zwoju*, przy czym warstwy były oznaczane od 1 do 11 licząc od wewnątrz do zewnątrz, natomiast zwoje od 1 do 92 licząc od góry do dołu warstwy. Zatem, skrajne górne zwoje każdej warstwy posiadały oznaczenia od 1-1 do 11-1, a skrajne dolne zwoje w warstwach od 1-92 do 11-92 (Rys. 7.2).

Uzwojenie GN posiadało dwa ekrany elektrostatyczne, otaczające je od strony średnicy wewnętrznej oraz zewnętrznej. Ekran wewnętrzny dołączono do zacisku liniowego uzwojenia (połączonego ze zwojem 1-1), natomiast zewnętrzny – do uziemionego punktu gwiazdowego (połączonego ze zwojem 11-92). Ekrany zostały wykonane w formie pasów folii aluminiowej naklejonych na tulei preszpanowej i połączonych ze sobą jednostronnie za pomocą linki

miedzianej, aby uniknąć zwartego zwoju. Uzwojenie dolnego napięcia zawierało 125 zwojów nawiniętych przewodem CTŻ o izolacji w postaci emalii odpornej na działanie gorącego oleju.

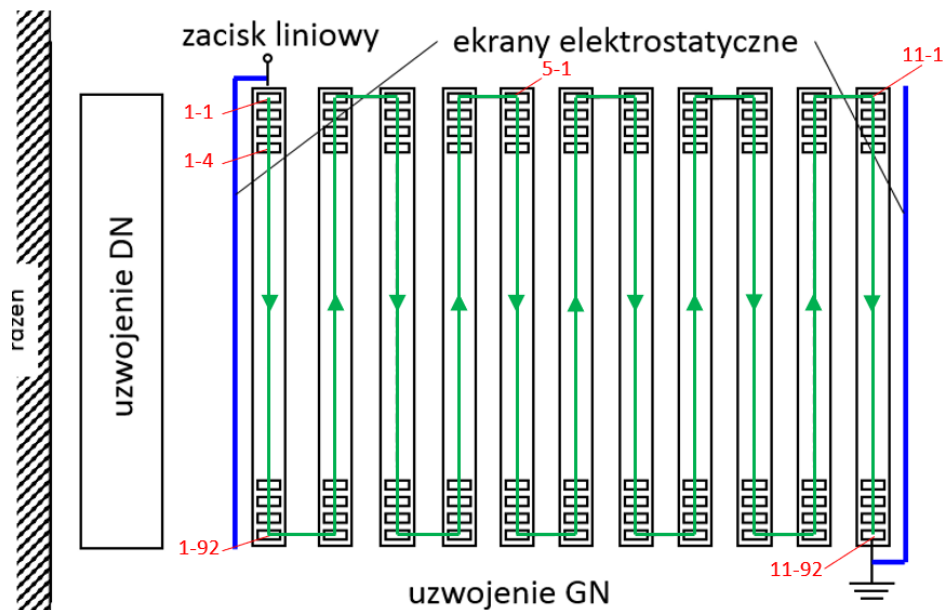
W eksperymentalnym modelu uzwojenia nie zastosowano klasycznego rdzenia magnetycznego. Jego wpływ uwzględniono w uproszczony sposób, przez zastosowanie makiety rdzenia w postaci zwoju blachy transformatorowej zimnowalcowanej zwiniętej w postaci cylindra i umieszczonej wewnątrz tulei nawojowej uzwojenia dolnego napięcia. Zwój blachy transformatorowej stanowił zatem ekwiwalent rdzenia z punktu widzenia zjawisk pojemnościowych. Przyjęto założenie, że przy badaniu rozkładu przepięć w uzwojeniu, podczas oddziaływania udaru piorunowego 1,2/50  $\mu$ s, wpływ magnetyzmu rdzenia można pominąć. Wpływ rdzenia stanowiącego powierzchnię ekwipotencjalną o potencjale ziemi na pojemności poprzeczne uzwojenia GN w analizowanym przypadku był znikomy, ze względu na zastosowanie ekranu wewnętrznego uzwojenia GN oraz uziemienie uzwojenia DN, które znajduje się pomiędzy uzwojeniem GN, a rdzeniem. Zdjęcie obiektu badań z widocznymi: uzwojeniem GN, DN i makietą rdzenia oraz uproszczony schemat przedstawiający przekrój jego geometrii znajdują się odpowiednio na Rys. 7.1 i Rys. 7.2. Podstawowe dane uzwojenia warstwowego przedstawiono w Tabeli 7.1.



*Rys. 7.1 Eksperymentalny model jednej fazy transformatora 63 MVA, 147 kV / 10,5 kV:  
- po kolei od wewnątrz: cylinder z blachy transformatorowej, tuleja nawojowa DN,  
uzwojenie DN, układ barier pomiędzy uzwojeniami DN i GN, tuleja nawojowa GN,  
11 warstw uzwojenia GN [13]*

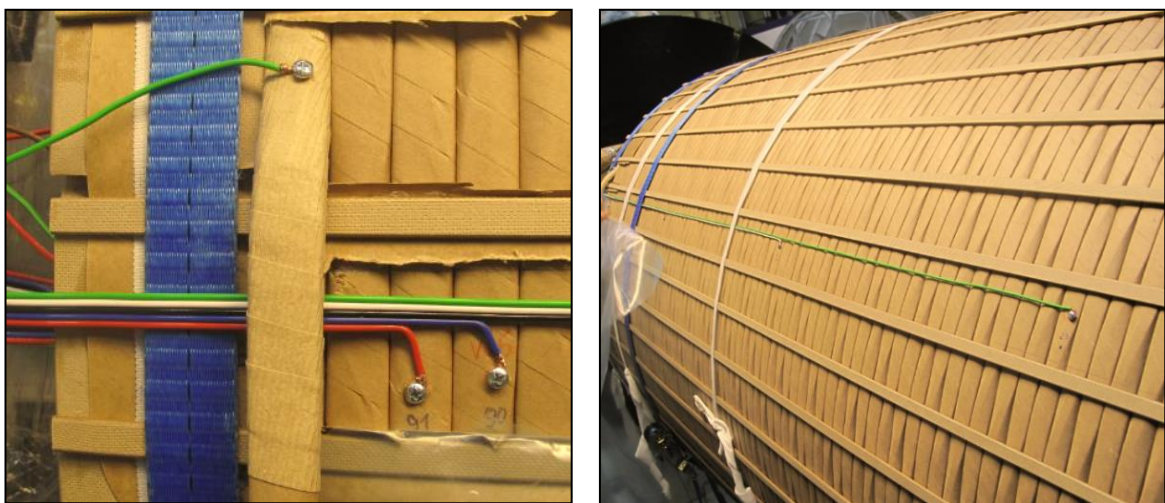
*Tabela 7.1. Podstawowe dane eksperymentalnego uzwojenia wielowarstwowego*

<b>Parametr</b>	<b>Wartość</b>	<b>Parametr</b>	<b>Wartość</b>
Liczba warstw	11	Średnica wewnętrzna	840 mm
Liczba zwojów w warstwie	92	Średnica zewnętrzna	1096 mm
Szerokość kanałów olejowych	3 – 5 mm	Odległość do ekranu wewn.	6 mm
Wysokość uzwojenia	1482 mm	Odległość do ekranu zewn.	6 mm



Rys. 7.2 Uproszczony przekrój eksperymentalnego uzwojenia wielowarstwowego transformatora energetycznego; kolorem czerwonym oznaczono numery zwojów; kolorem zielonym oznaczono kierunek nawinięcia zwojów w warstwach

W trakcie nawijania uzwojenia wielowarstwowego, zostały w nim zamontowane wyprowadzenia (sondy) pomiarowe służące do rejestracji czasowych przebiegów napięć w różnych punktach uzwojenia. W każdej warstwie zamontowano kilka wyprowadzeń pomiarowych, w różnych zwojach. Wyprowadzenia zamontowane na górze (zwoje od numeru 1-1 do 11-1), w środku (zwoje od numeru 1-46 do 11-46) oraz na dole (zwoje od numeru 1-92 do 11-92) każdej warstwy miały szczególnie ważne znaczenie dla określenia charakteru narażeń przepięciowych w uzwojeniu o takiej konstrukcji, ponieważ dostarczały informacji o przepięciach pomiędzy poszczególnymi warstwami w środku oraz na ich skrajach. Końce sond pomiarowych zostały wyprowadzone na zewnątrz uzwojenia w taki sposób, aby zminimalizować wpływ sprzężeń pojemnościowych na rejestrowane wyniki – zastosowano przewody wstążkowe o stałej odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami. Sposób montażu przedstawiono na Rys. 7.3.



Rys. 7.3 Sposób montażu wyprowadzeń (sond) pomiarowych w uzwojeniu

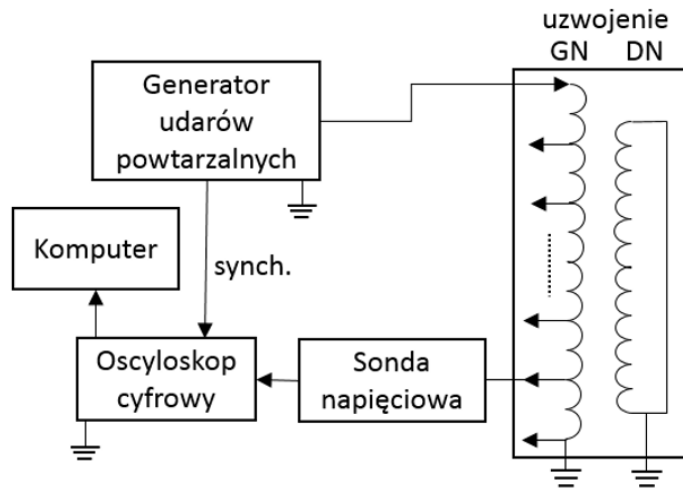
## 7.2 Badania i analiza przebiegów w ekranowanym uzwojeniu wielowarstwowym transformatora energetycznego

Analizę rozkładu napięć piorunowych przeprowadzono na podstawie wyników rejestracji przebiegów przebiegów w eksperymentalnym układzie uzwojeń jednej fazy transformatora o napięciu 147 kV / 10,5 kV i mocy znamionowej 63 MVA. Badania przebiegów przeprowadzono metodą z oscyloskopową rejestracją czasowych przebiegów napięcia, przy wykorzystaniu generatora udarów powtarzalnych - metoda *RSO* (*Recurrent Surge Oscillograph*). W metodzie tej zakłada się liniowość przebiegów impulsowych względem napięcia. Zastosowanie takiego podejścia zapewnia wierne odwzorowanie warunków testowania badanego obiektu poprzez uwzględnienie rzeczywistego sposobu połączeń oraz wymiarów obiektu, jak również uwzględnienie rzeczywistych parametrów materiałowych [131].

Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 7.4. Udarzy napięciowe były wytwarzane za pomocą niskonapięciowego generatora udarów powtarzalnych, a do obserwacji przebiegów czasowych napięć posłużono się oscyloskopem cyfrowym. Odpowiedni kształt udaru uzyskany był przez dobór rezystancji i pojemności obwodu. Częstotliwość repetycji udaru była zbliżona do częstotliwości sieciowej, ale jej nierówna, w celu uniknięcia zakłóceń sieciowych oraz wytłumienia się przebiegów wyrównawczych przed okresem powtórzenia udaru [131]. Przebiegi przebiegów rejestrowano w punktach pomiarowych zlokalizowanych na początku, w środku oraz na końcu każdej warstwy uzwojenia, w miejscach umieszczenia wyprowadzeń pomiarowych. Sondy pomiarowe zostały wyprowadzone na tablicę pomiarową, na której dokonywane były wszelkie połączenia. Udar z generatora był doprowadzony do zacisków wejściowych uzwojenia GN, a wybrane na tablicy punkty pomiarowe łączone były kolejno z sondą oscyloskopu. Przebiegi napięcia były rejestrowane metodą fotograficzną (w formie zdjęć).

Pomiary zostały przeprowadzone w kilku konfiguracjach połączenia uzwojenia i ekranów elektrostatycznych. Ekran były dołączane oraz odłączane od odpowiednich zacisków uzwojenia. Odłączenie jednego bądź obu ekranów odpowiadało sytuacji, w której ekran utracił kontakt elektryczny z uzwojeniem np. w czasie transportu, przez niewłaściwe połączenie na etapie produkcji, lub w wyniku stanu awaryjnego. W tych przypadkach ekrany fizycznie cały czas znajdowały się w badanym układzie, ale były jedynie pojemnościowo sprzężone z badanym uzwojeniem (znajdowały się na pływającym potencjale). Analizowano również konfigurację bez zewnętrznego ekranu, z ekranem wewnętrznym podłączonym oraz odłączonym od początku uzwojenia.

Przeprowadzone w ramach realizacji pracy doktorskiej badania i analizy miały na celu zbadanie wpływu konfiguracji połączenia ekranów elektrostatycznych z uzwojeniem wielowarstwowym na przebiegi i wartości maksymalne przebiegów wewnątrz uzwojenia.



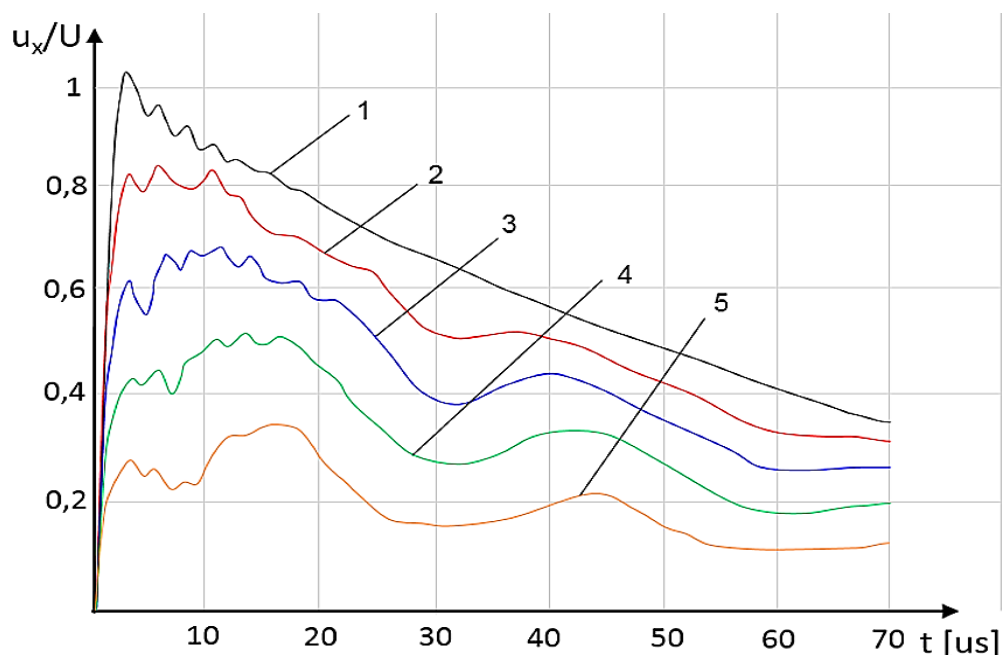
Rys. 7.4 Schemat blokowy układu pomiarowego do rejestracji napięć metodą RSO [6]

W czasie badań, rejestrowane były przebiegi napięć doziemnych, międzywarstwowych oraz międzyzwojowych w wybranych punktach uzwojenia. Przykładowe fotografie oscylogramów napięć międzywarstwowych oraz doziemnych przedstawiono na Rys. 7.5. Na przebiegach wyraźnie widać silnie tłumione oscylacje wysokoczęstotliwościowe, szczególnie na przykładzie napięcia międzywarstwowego. Przebiegi napięć pomiędzy warstwami oraz pomiędzy zwojami, były wykorzystywane do weryfikacji wytrzymałości izolacji. Dokładne dane dotyczące tych rejestracji są danymi wrażliwymi i stanowią tajemnicę firmy ABB (obecnie Hitachi Energy). Z tego względu niektóre wyniki przeprowadzonych badań i analiz nie mogą być upublicznione w niniejszej pracy.



Rys. 7.5 Zarejestrowany przebieg napięcia międzywarstwowego (a) oraz doziemnego (b)

Przebiegi czasowe napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia wielowarstwowego z dołączonymi dwoma ekranami elektrostatycznymi, przy atakowaniu jego zacisku wejściowego udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s, przedstawiono na Rys. 7.6. Ekran wewnętrzny znajdował się na wysokim potencjale, podczas gdy zewnętrzny był uziemiony. Wartości napięcia są wyrażone w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości szczytowej doprowadzonego udaru piorunowego.

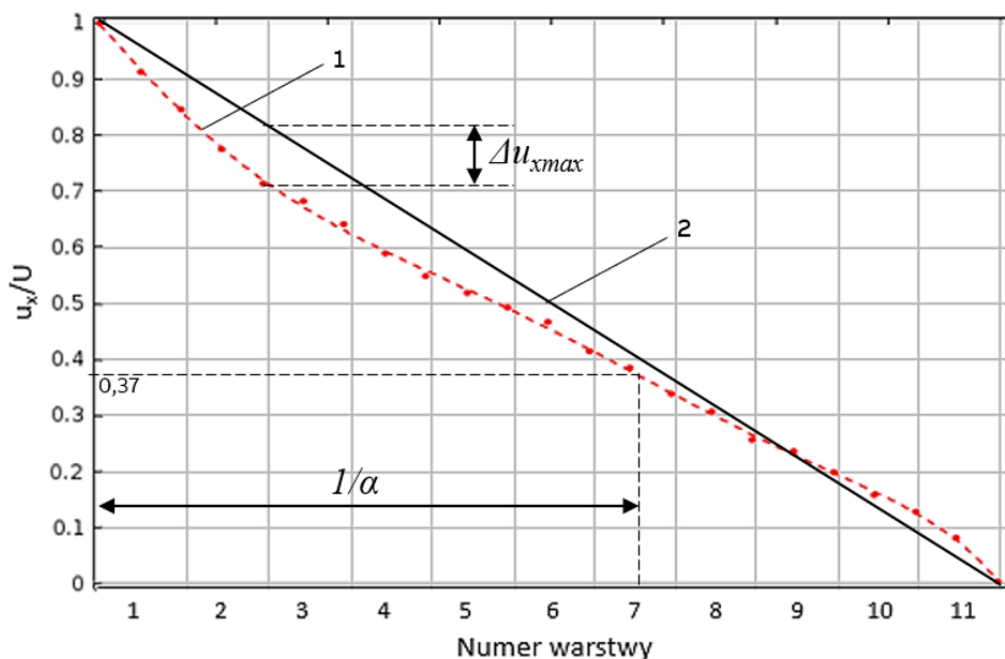


Rys. 7.6 Przebiegi prępień doziemnych w wybranych punktach uzwojenia wielowarstwowego z dołączonymi dwoma ekranami elektrostatycznymi: 1 – udar napięciowy doprowadzony do uzwojenia, 2 – prępiecie na warstwie nr 2, 3 – prępiecie na warstwie nr 4, 4 – prępiecie na warstwie nr 6, 5 – prępiecie na warstwie nr 8

Analizując przedstawione oscylogramy prępień doziemnych, można zauważyć silnie tłumione oscylacje podstawowej harmonicznej, której okres drgań jest jednakowy we wszystkich punktach uzwojenia. W czasie od 0 do 20  $\mu\text{s}$  występują oscylacje wysokiej częstotliwości nałożone na drgania o podstawowej harmonicznej. Po tym czasie, oscylacje wysokoczęstotliwościowe wytłumiają się i występują jedynie drgania własne uzwojenia. W żadnym punkcie uzwojenia prępiecia doziemne nie przekraczają wartości maksymalnej udaru doprowadzonego do zacisków uzwojenia. Analizując wartości maksymalne prępień w wybranych punktach uzwojenia można zauważyć, że rozkład prępień wzdłuż uzwojenia jest równomierny. Można również zauważyć, że napięcie w poszczególnych punktach uzwojenia narasta praktycznie bez opóźnień w odniesieniu do czoła udaru.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów prępień doziemnych wyznaczono pseudo-początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu (Rys. 7.7). Rozkład został utworzony na podstawie przebiegów prępień piorunowych zarejestrowanych na początku, w środku i na końcu każdej warstwy uzwojenia (3 punkty pomiarowe na każdą warstwę). Założono, że napięcia zarejestrowane w punktach łączących poszczególne warstwy są jednakowe (np. napięcie na końcu pierwszej warstwy jest równe napięciu na początku warstwy drugiej). Założenie to zostało zweryfikowane pomiarowo i oceniono, że takie uproszczenie nie wpływa na wyznaczony początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu. Rozkład został utworzony dla chwili, w której udar przechodzi przez wartość szczytową ( $t=1,2 \mu\text{s}$ ). Rozkład pseudo-początkowy przedstawiono na tle idealnego, liniowego rozkładu końcowego.

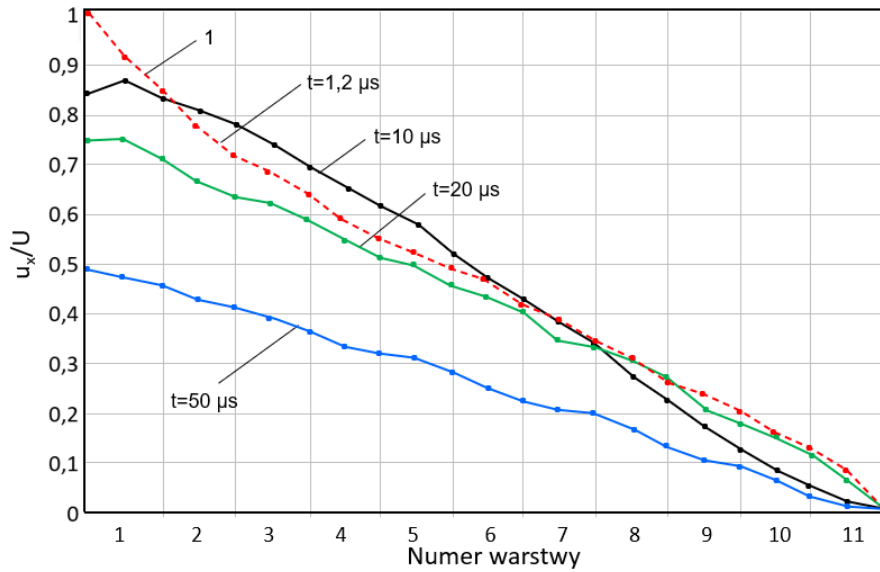




Rys. 7.7 Pseudo-początkowy rozkład napięcia (1) wyznaczony na podstawie rejestracji przebiegów przepięć piorunowych w uzwojeniu wielowarstwowym z dołączonymi dwoma ekranami elektrostatycznymi (Rys. 7.6); 2 – idealny rozkład końcowy

Otrzymany pomiarowo pseudo-początkowy rozkład napięcia jest zbliżony do liniowego i odpowiada współczynnikowi  $\alpha=1,2-2$  (wyznaczone w różnych punktach metodą geometryczną wyjaśnioną na Rys. 5.17). Współczynnik  $\alpha$  wyznaczony uproszczoną metodą Norrisa, wyjaśnioną w rozdziale 5.4.1, wynosi 1,67 (przy  $u_x/U=0,37$ ). Niska wartość parametru  $\alpha$  to bardzo korzystna cecha analizowanej konstrukcji, ponieważ zapewnia niemal równomierny rozkład narażeń piorunowych izolacji pomiędzy poszczególnymi warstwami. Dzięki temu, można zastosować taką samą izolację oraz odstępów pomiędzy kolejnymi warstwami. Należy zwrócić uwagę, że nawet w obrębie początkowych warstw uzwojenia, rozkład pseudo-początkowy napięcia nie odbiega znacząco od liniowego rozkładu końcowego, pomimo zastosowania pomiędzy nimi szerszych kanałów olejowych, aż do warstwy numer 4, przez co sprzężenie pojemnościowe początkowego fragmentu uzwojenia było mniejsze niż w jego dalszej części.

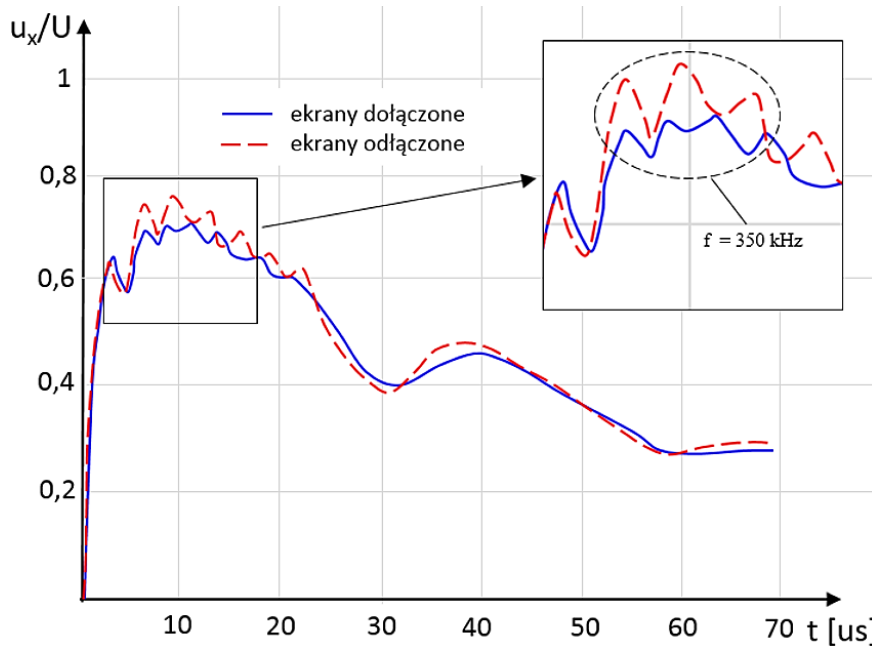
Największe odchylenie rozkładu pseudo-początkowego od rozkładu liniowego wynosi  $\Delta u_{xmax}=10\%$  wartości szczytowej napięcia i jest zlokalizowane na końcu warstwy drugiej. Świadczy to o niewielkich oscylacjach wyrównawczych jakie mogą pojawić się w uzwojeniu podczas oddziaływania przebiegów udarowych, co potwierdzają chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia, wyznaczone pomiarowo dla różnych chwil czasu  $t$  i przedstawione na Rys. 7.8. Można zauważyć, że rozkłady napięcia w chwilach czasu  $t=10\ \mu s$  i  $t=20\ \mu s$  nie odbiegają znacząco od liniowego, a rozkład napięcia w chwili  $t=50\ \mu s$  jest już praktycznie liniowy. Wyznaczone chwilowe rozkłady napięcia wraz z rozkładem pseudo-początkowym wskazują, że nie należy spodziewać się znacznych naprężeń międzywarstwowych, nawet przy początku uzwojenia, ze względu na równomierne rozłożenie napięć pomiędzy poszczególnymi warstwami.



Rys. 7.8 Chwilowe rozkłady napięcia w różnych chwilach czasu  $t$  oddziaływania udaru piorunowego oraz rozkład pseudo-początkowy (1) wzdłuż obustronnie ekranowanego uzwojenia wielowarstwowego transformatora energetycznego

### 7.2.1 Wpływ ekranów na przepięcia doziemne i międzywarstwowe w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora

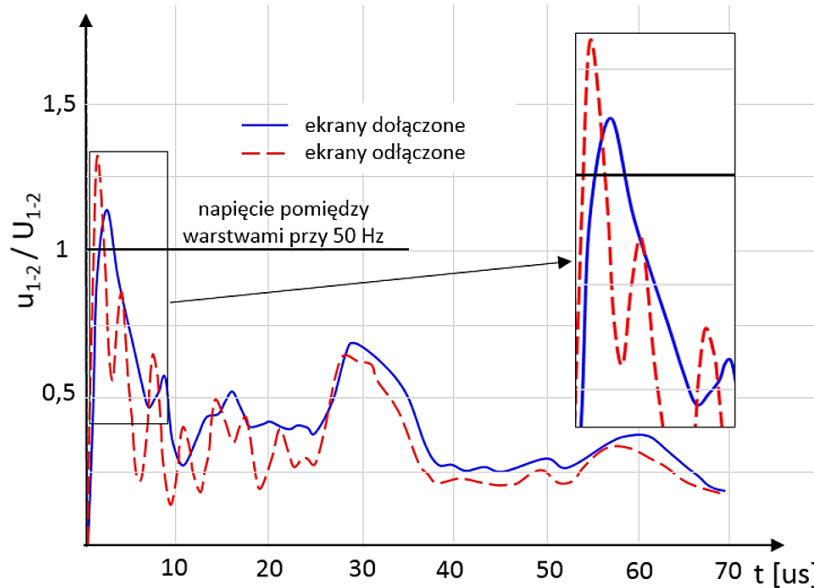
W ramach realizacji pracy doktorskiej, eksperymentalnie zbadano wpływ ekranów elektrostatycznych na kształt przebiegów przepięć doziemnych w uzwojeniu wielowarstwowym, co zostało przedstawione na Rys. 7.9, na przykładzie przebiegów przepięć doziemnych zarejestrowanych w czwartej warstwie uzwojenia z ekranami podłączonymi oraz odłączonymi od uzwojenia (oba ekrany na pływającym potencjale).



Rys. 7.9 Przebiegi czasowe przepięć doziemnych w czwartej warstwie uzwojenia z ekranami dołączonymi (linia ciągła) oraz odłączonymi (linia przerywana) [6]

Na przedstawionych przebiegach napięć doziemnych można zauważyć, że odłączenie ekranów elektrostatycznych od obu końców uzwojenia spowodowało wzrost amplitudy wysokoczęstotliwościowych oscylacji napięć pomiędzy  $t=0 \mu\text{s}$ , a  $t=25 \mu\text{s}$ , ale praktycznie nie zmieniło ich częstotliwości ( $f=350 \text{ kHz}$ ). Częstotliwości drgań własnych uzwojenia w obu przypadkach były również jednakowe.

Zbadano również wpływ podłączenia i odłączenia ekranów od uzwojenia, na kształt przebiegów napięć międzywarstwowych. Na Rys. 7.10 przedstawiono porównanie przebiegów napięć międzywarstwowych pomiędzy pierwszą, a drugą warstwą uzwojenia. Wartości napięć pomiędzy warstwami są wyrażone w wartościach względnych w odniesieniu do wartości napięcia pomiędzy tymi warstwami, wynikającej z liniowego rozkładu końcowego.



Rys. 7.10 Przebiegi czasowe napięć pomiędzy pierwszą i drugą warstwą uzwojenia z ekranami dołączonymi (linia ciągła) oraz odłączonymi (linia przerywana) [6]

Podobnie jak w przypadku napięć doziemnych, odłączenie ekranów od uzwojenia, spowodowało wzrost amplitudy oscylacji wysokoczęstotliwościowych, ale w przypadku napięć międzywarstwowych wzrosła również ich częstotliwość. Dla uzwojenia warstwowego z dwoma ekranami dołączonymi do jego zacisków, wartość maksymalna napięcia pomiędzy dwoma początkowymi warstwami jest o ok. 13% wyższa niż wartość napięcia pomiędzy nimi przy liniowym rozkładzie końcowym napięcia (np. zasilanie transformatora ze źródła o częstotliwości 50 Hz). Odłączenie obu ekranów powoduje wzrost napięcia pomiędzy tymi warstwami do wartości o 31% wyższej niż przy rozkładzie liniowym. Dodatkowo, w tym przypadku na przebiegach napięcia pojawiają się oscylacje wysokoczęstotliwościowe o znacznie większych stromościach  $dU/dt$ , które mogą stanowić dodatkowe narażenia dla izolacji wzdłużnej uzwojeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że prawidłowe połączenie ekranów do odpowiednich zacisków uzwojenia wielowarstwowego, jest kluczowe dla jego bezpieczeństwa w czasie prób odbiorczych i w eksploatacji - w czasie oddziaływania napięć piorunowych. Jest to szczególnie ważne w kontekście izolacji międzywarstwowej. Odłączenie ekranów od uzwojenia powoduje zwiększenie amplitudy wysokoczęstotliwościowych oscylacji, które propagują w głąb uzwojenia stanowiąc dodatkowe zagrożenie dla izolacji.

## 7.2.2 Wpływ konfiguracji ekranów względem uzwojenia na rozkład wartości maksymalnych napięć doziemnych w uzwojeniu wielowarstwowym

W ramach pracy, przeprowadzona została eksperymentalna analiza rozkładu wartości maksymalnych napięć w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora, w zależności od położenia ekranów i ich polaryzacji (podłączenia, odłączenia, fizycznego usunięcia) względem uzwojenia. Ekran były łączone odpowiednio z początkiem i z końcem uzwojenia. Analizowano konfiguracje i polaryzacje ekranów względem uzwojenia przedstawione w Tabeli 7.2. Otrzymane wartości maksymalne napięć były porównywane do wartości napięcia w uzwojeniu, wynikającego z idealnego, liniowego rozkładu końcowego.

Tabela 7.2. Konfiguracje i polaryzacje ekranów względem uzwojenia wielowarstwowego (*HV* – wysoki potencjał, *GND* – uziemienie, *FP* – pływający potencjał)

Konfiguracja	Ekran wewnętrzny	Ekran zewnętrzny
1	podłączony ( <i>HV</i> )	podłączony ( <i>GND</i> )
2	podłączony ( <i>HV</i> )	odłączony ( <i>FP</i> )
3	odłączony ( <i>FP</i> )	podłączony ( <i>GND</i> )
4	odłączony ( <i>FP</i> )	odłączony ( <i>FP</i> )
5	podłączony ( <i>HV</i> )	-
6	odłączony ( <i>FP</i> )	-

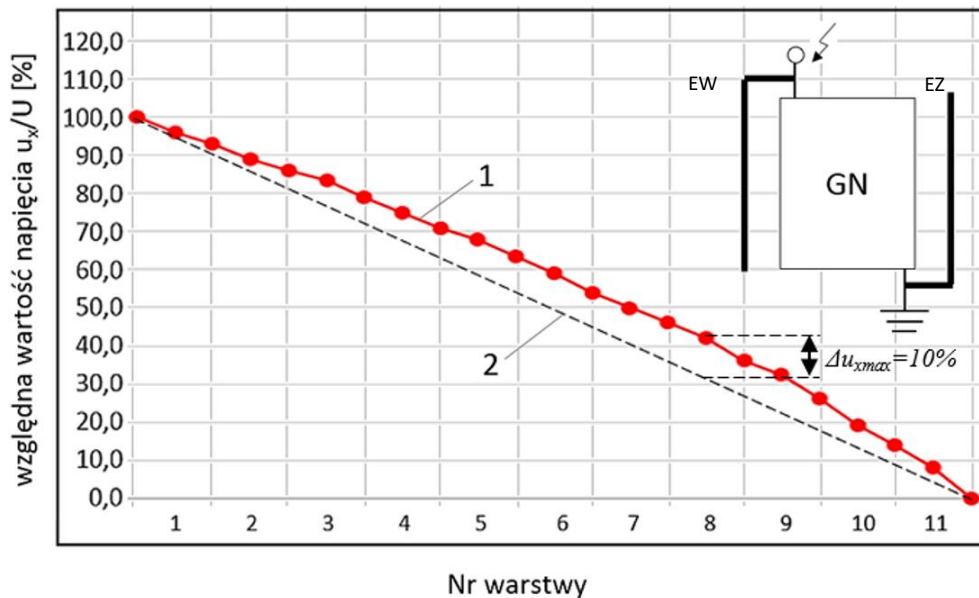
Analiza polegała na wyznaczeniu maksymalnych wartości napięć występujących w punktach pomiarowych zlokalizowanych na początku, końcu i w środku każdej warstwy uzwojenia. Następnie wyznaczono obwiednie maksymalnych napięć występujących wzdłuż uzwojenia wielowarstwowego i poddano analizie porównawczej, w celu zbadania wpływu ekranów i ich polaryzacji na wartości maksymalne napięć w poszczególnych obszarach uzwojenia. W zależności od konkretnej konfiguracji, ekrany znajdowały się na wysokim potencjale *HV* (połączenie z początkiem uzwojenia), na potencjale pływającym *FP* (odłączenie od zacisków uzwojenia), lub na potencjale ziemi *GND* (połączenie z uziemionym końcem uzwojenia). W rozdziale 7.2.4 przedstawiono analityczne porównanie skuteczności ekranów do ograniczania maksymalnych wartości napięć dla analizowanych konfiguracji uzwojenia (Tabela 7.2).

### - Konfiguracja 1.

Pierwsza konfiguracja dotyczyła uzwojenia z dwoma ekranami, wewnętrznym i zewnętrznym, podłączonymi odpowiednio do zacisku liniowego (wysoki potencjał) i uziemionego końca uzwojenia. Ta konfiguracja jest traktowana jako referencja dla wszystkich pozostałych konfiguracji, ponieważ jest to układ w jakim powinno pracować uzwojenie transformatora zgodnie z jego projektem i konstrukcją.

Na Rys. 7.11 przedstawiony został rozkład maksymalnych wartości napięć wzdłuż uzwojenia (linia czerwona) w odniesieniu do idealnego, liniowego rozkładu końcowego

napięcia, panującego w uzwojeniu przy zasilaniu napięciem o częstotliwości sieciowej. Wartości napięcia są wyrażone w procentach, w odniesieniu do wartości szczytowej doprowadzonego udaru piorunowego.



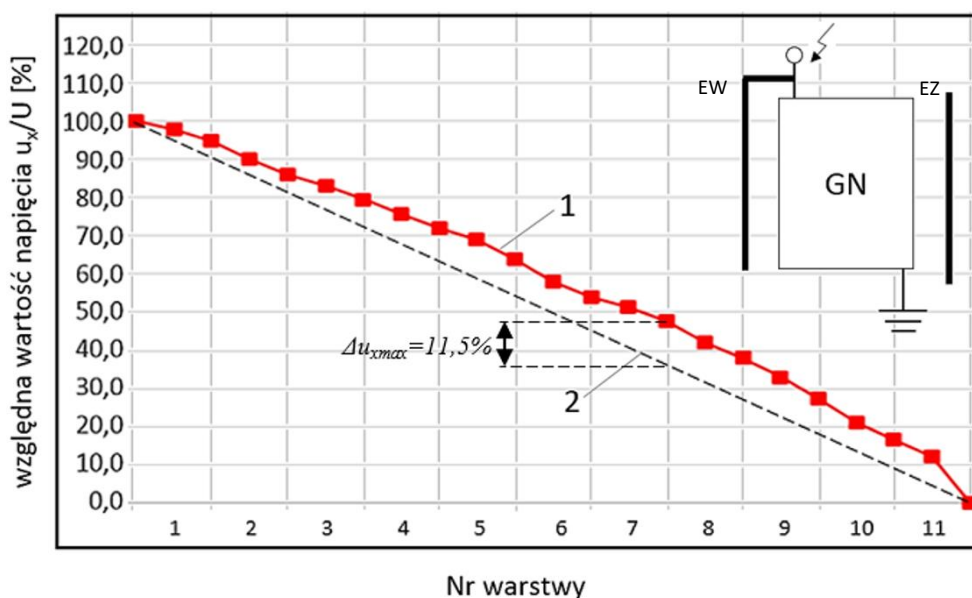
Rys. 7.11 Rozkład maksymalnych wartości przebiegów doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - podłączony do zacisku liniowego (wysoki potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) – uziemiony

Na Rys. 7.11 wyraźnie widać, że wartości maksymalne przebiegów wzdłuż całego uzwojenia są nieznacznie wyższe niż napięcie wynikające z idealnego rozkładu końcowego, co jest w zgodzie z oczekiwaniami bazującymi na wyznaczonym wcześniej rozkładzie pseudopoczątkowym (Rys. 7.7). Największa różnica pomiędzy rozkładem napięć maksymalnych, a rozkładem końcowym  $\Delta u_{xmax}$ , występuje w połowie ósmej warstwy i wynosi 10% wartości szczytowej napięcia udarowego. Potwierdza to przypuszczenie o korzystnym wpływie ekranów na wyrównanie przejściowych rozkładów napięcia w uzwojenia, przez konstrukcyjne zwiększenie pojemności szeregowej uzwojenia, głównie na jego początku. Dzięki temu, w obrębie pierwszej warstwy nie występuje spiętrzenie napięcia, przez co wartości przebiegów w dalszej części uzwojenia również nie są znaczące. Wartości maksymalne przebiegów w stosunku do rozkładu końcowego, są największe w głębi uzwojenia i maleją wraz ze zbliżaniem się do jego początku oraz końca, co jednoznacznie wskazuje na to, że wpływ ekranów jest największy na początkowych i końcowych warstwach uzwojenia. Na środkowych warstwach uzwojenia, wpływ ekranów na przebiegi jest niewielki – co oznacza brak sprzężenia pojemnościowego środkowych warstw z ekranami.

## - Konfiguracja 2.

Druga konfiguracja dotyczy przypadku, w którym ekran wewnętrzny jest galwanicznie połączony z początkiem uzwojenia (jak w konfiguracji 1), natomiast zewnętrzny ekran jest odłączony od uziemionego punktu neutralnego transformatora. Ekran zewnętrzny znajduje się zatem na pływającym potencjale i jest jedynie pojemnościowo sprzężony z uzwojeniem. Taki układ odpowiada sytuacji, w której utracone zostało połączenie zewnętrznego ekranu z uzwojeniem, na przykład na skutek awarii, czy też niewłaściwego połączenia na etapie produkcji.

Rozkład wartości maksymalnych napięć doziemnych dla tej konfiguracji uzwojenia i ekranów, w odniesieniu do idealnego rozkładu końcowego, przedstawiono na Rys. 7.12. Brak połączenia elektrycznego pomiędzy uziemionym punktem neutralnym i zewnętrznym ekranem, spowodował osłabienie sprzężenia pojemnościowego zewnętrznych warstw i tym samym wzrost wartości napięć w końcowym fragmencie uzwojenia. Nie miało to jednak wpływu na napięcia w początkowej części uzwojenia, bo te są determinowane głównie przez ekran wewnętrzny. Największa odchyłka od idealnego rozkładu końcowego jest zlokalizowana na początku warstwy 8 i wynosi 11,5%. Napięcia w połowie ostatniej (jedenastej) warstwy uzwojenia wzrosły o 5% w stosunku do przypadku referencyjnego, w którym ekran zewnętrzny był podłączony do uzwojenia. Można zatem wysnuć wniosek, że utrata połączenia zewnętrznego, uziemionego ekranu od uzwojenia nie wpłynęła w znaczący sposób na zwiększenie narażeń napięciowych w rozważanym uzwojeniu. Świadczy to o korzystnej konstrukcji uzwojenia pod względem narażeń napięciowych i mniejszej istotności podłączenia ekranu zewnętrznego na kreowanie zagrożeń izolacji od przebiegów piorunowych.

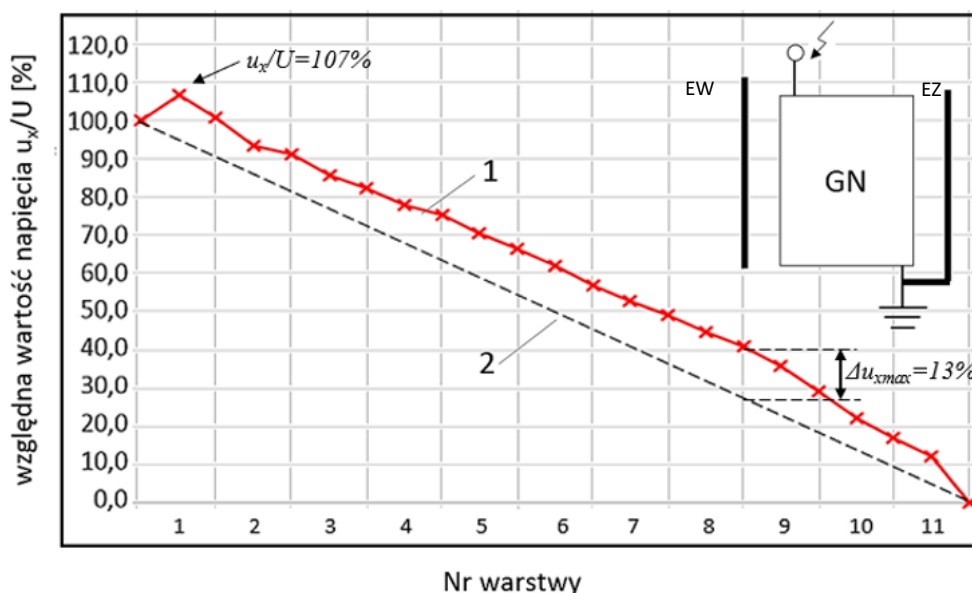


Rys. 7.12 Rozkład maksymalnych wartości napięć doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - podłączony do zacisku liniowego (wysoki potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) – odłączony od uzwojenia (pływający potencjał)

### - Konfiguracja 3.

W trzeciej konfiguracji ekran wewnętrzny został odłączony od zacisku liniowego, natomiast ekran zewnętrzny był podłączony do uziemionego końca ostatniej warstwy uzwojenia. W tym przypadku ekran wewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale i był jedynie pojemnościowo sprzężony z uzwojeniem. Taki przypadek odpowiada sytuacji utraty połączenia ekranu z uzwojeniem na skutek awarii lub błędnego montażu.

Rozkład wartości maksymalnych przebiegów wzdłuż uzwojenia dla tej konfiguracji przedstawiono na Rys. 7.13. Odłączenie ekranu wewnętrznego od początku uzwojenia spowodowało osłabienie sprzężenia pojemnościowego początkowych warstw uzwojenia i wzrost wartości maksymalnych przebiegów w tym obszarze. Zmniejszyła się wartość pojemności szeregowej na początku uzwojenia, przez co wzrosły przebiegi na pierwszej warstwie, które doprowadziły również do wzrostu poziomu napięć w dalszej części uzwojenia, w środkowym i końcowym obszarze. Wartość maksymalna przebiegów doziemnych w tym przypadku była większa o 7% od wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia. W połowie pierwszej warstwy przebiegię przewyższyło wartość napięcia wynikającą z rozkładu końcowego o 12%, a na początku warstwy nr 9 o 13%. Poziom przebiegię na ostatniej warstwie był nieznacznie większy niż w przypadku konfiguracji 2, w której ekran zewnętrzny nie był podłączony do uzwojenia. Warto zauważyć, że w rozpatrywanej konfiguracji, w każdym miejscu uzwojenia przebiegię były wyższe niż w poprzednich dwóch konfiguracjach (1 i 2). Można zatem wysnuć wniosek, że połączenie ekranu wewnętrznego z początkiem uzwojenia jest kluczowe dla bezpieczeństwa uzwojenia podczas zdarzeń przebiegiowych i znacząco ogranicza te narażenia. Utrata połączenia ekranu wewnętrznego od początku uzwojenia wpływa na zwiększenie przebiegów w całym uzwojeniu.

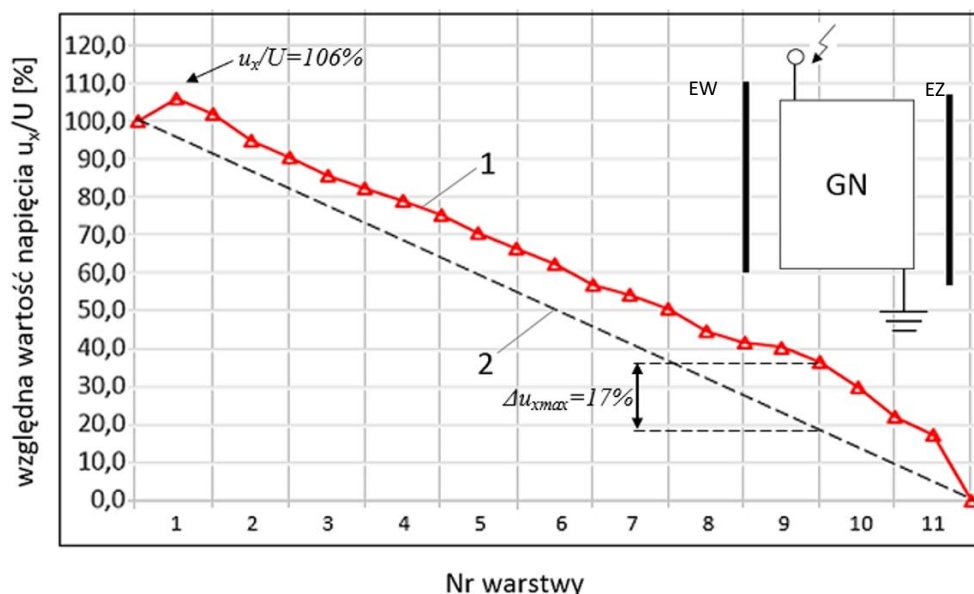


Rys. 7.13 Rozkład maksymalnych wartości przebiegów doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - odłączony od zacisku liniowego (pływający potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) - uziemiony

## - Konfiguracja 4.

Kolejna analizowana konfiguracja dotyczy uzwojenia z odłączonymi dwoma ekranami - zarówno ekran wewnętrzny, jak i zewnętrzny znajdowały się na pływającym potencjale i były jedynie pojemnościowo sprzężone z uzwojeniem. Taki zabieg, znacząco osłabił sprzężenie pojemnościowe w początkowej i końcowej części uzwojenia. Na podstawie analizy wcześniejszych konfiguracji, należy oczekiwać zwiększenia przepięć w całym uzwojeniu, wynikającego z odłączenia ekranu od strony wewnętrznej oraz dodatkowego wzrostu napięć na ostatnich warstwach, wynikającego z odłączenia ekranu zewnętrznego.

Rozkład przepięć maksymalnych dla tej konfiguracji znajduje się na Rys. 7.14. Przypadek uzwojenia z odłączonymi dwoma ekranami można rozważać jako kombinację konfiguracji numer 2 i 3, przedstawionych wcześniej. Jak można było się spodziewać na podstawie analiz poprzednich konfiguracji, odłączenie obu ekranów, spowodowało wzrost przepięć w całym uzwojeniu. Wartość maksymalna przepięć na początku uzwojenia wzrosła w podobnym stopniu jak w konfiguracji, w której jedynie wewnętrzny ekran był odłączony od uzwojenia. Przepięcia w końcowej części uzwojenia wzrosły znacząco w porównaniu do poprzednich przypadków, ponieważ przez odłączenie zewnętrznego ekranu osłabiło się sprzężenie pojemnościowe na końcu uzwojenia, a dodatkowo wystąpiło spiętrzenie przepięcia, wynikające ze wzrostu napięcia na początkowych warstwach na skutek odłączenia ekranu wewnętrznego. Największy wzrost napięcia w odniesieniu do idealnego rozkładu końcowego wystąpił w obrębie warstw od 8 do 10. Największa odchyłka od rozkładu końcowego to 17% wartości szczytowej, na początku warstwy nr 10. Maksymalna wartość przepięć jakie wystąpiły w całym uzwojeniu, przewyższyła o 6% wartość szczytową udaru doprowadzonego do uzwojenia. Zaprezentowane wyniki potwierdzają kluczową rolę podłączenia ekranu wewnętrznego w ograniczaniu poziomu napięć udarowych w uzwojeniu.



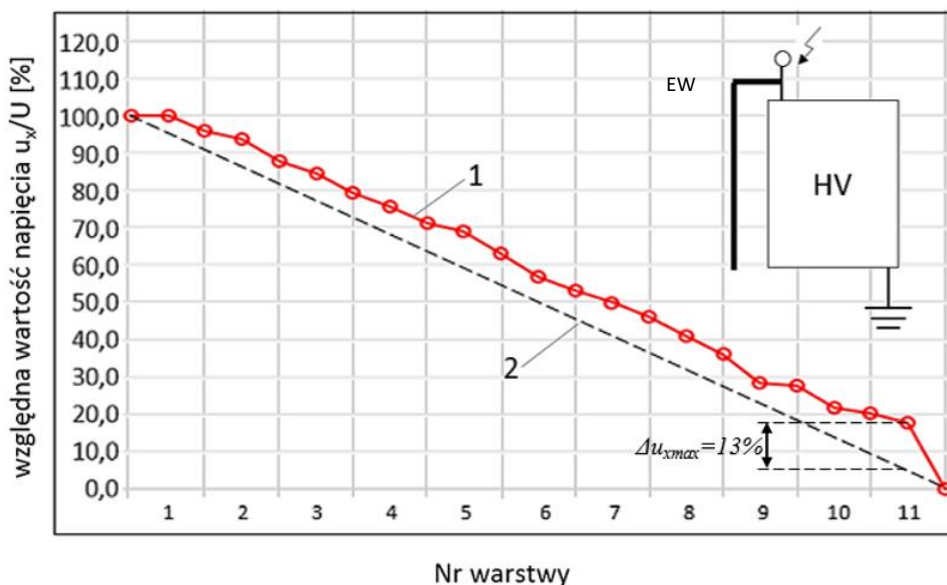
Rys. 7.14 Rozkład maksymalnych wartości przepięć doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - odłączony od zacisku liniowego (pływający potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) – odłączony od końca uzwojenia (pływający potencjał)



## - Konfiguracja 5.

W analizowanej konfiguracji, uzwojenie posiadało jedynie wewnętrzny ekran, który był połączony galwanicznie z początkiem uzwojenia. Ekran zewnętrzny został fizycznie usunięty (zdemontowany) z modelu uzwojenia.

Rozkład wartości maksymalnych przepięć doziemnych na tle idealnego rozkładu końcowego w uzwojeniu wielowarstwowym z podłączonym jedynie ekranem liniowym, ale bez ekranu od strony punktu gwiazdowego przedstawiono na Rys. 7.15. W rozważanej konfiguracji przepięcia w początkowej oraz środkowej części uzwojenia osiągają podobne wartości maksymalne, jak w przypadku pierwszej oraz drugiej z analizowanych konfiguracji (w których ekran wewnętrzny również był podłączony do zacisku liniowego) – wszystkie te układy cechowały się jednakowym rozkładem pojemności doziemnych i szeregowych w obrębie początkowego i środkowego obszaru uzwojenia. Inne warunki panowały natomiast w obrębie końca uzwojenia, szczególnie jego ostatniej warstwy, ze względu na eliminację pojemności pomiędzy uzwojeniem, a ekranem zewnętrznym. W efekcie, przepięcia w końcowej części uzwojenia są nieznacznie wyższe niż w przypadku konfiguracji o numerach 2 i 4, w których ekran zewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale. Największa odchyłka od idealnego rozkładu końcowego wystąpiła w środku ostatniej warstwy i osiągnęła 13% wartości szczytowej udaru. Przepięcia w żadnym fragmencie uzwojenia nie przekroczyły wartości szczytowej udaru doprowadzonego. Niewielki wzrost przepięć na końcu uzwojenia przy braku ekranu zewnętrznego, w porównaniu do sytuacji, gdy znajdował się on na pływającym potencjale wskazuje, że w przypadku braku galwanicznego połączenia ostatniej warstwy z ekranem, ich sprzężenie pojemnościowe jest na tyle małe, że nie wpływa znacząco na zmianę narażeń przepięciowych na końcu uzwojenia. Można zatem wnioskować, że wpływ obecności ekranu zewnętrznego, w przypadku braku jego połączenia z uzwojeniem (pływający potencjał), na przepięcia na końcu uzwojenia jest relatywnie mały (wzrost przepięć w ostatniej warstwie o ok. 5% wartości szczytowej w porównaniu do Rys. 7.12).

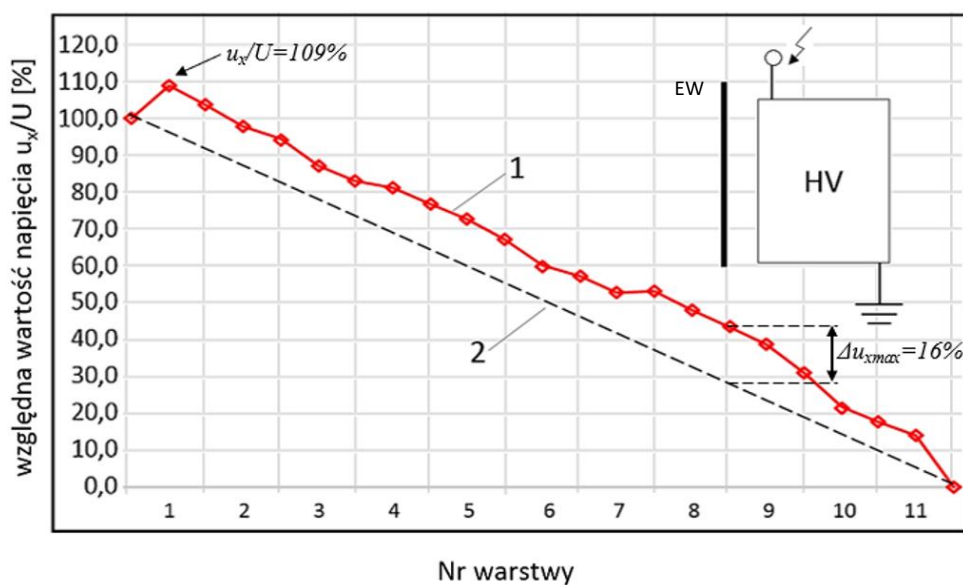


Rys. 7.15 Rozkład maksymalnych wartości przepięć doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - podłączony do zacisku liniowego (pływający potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) – brak

## Konfiguracja 6.

Ostatni przypadek dotyczy uzwojenia, w którym ekran wewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale i nie był galwanicznie połączony z zaciskiem liniowym uzwojenia, a ekran zewnętrzny był fizycznie zdemonstowany z modelu uzwojenia.

Rozkład wartości maksymalnych napięć doziemnych na tle rozkładu końcowego dla tego przypadku, przedstawiono na Rys. 7.16. Na podstawie wcześniejszych analiz, oczekiwano wzrostu napięć na początku uzwojenia, przez osłabienie sprzężenia pojemnościowego uzwojenia z ekranem oraz eskalacji tego wzrostu napięcia w głąb uzwojenia, co zostało potwierdzone w zaprezentowanych wynikach. Najwyższa zarejestrowana wartość napięcia w uzwojeniu wyniosła 109% wartości szczytowej udaru doprowadzonego i została zaobserwowana w połowie pierwszej warstwy. Największa odchyłka pomiędzy rozkładem napięć maksymalnych, a idealnym rozkładem końcowym wystąpiła na początku warstwy nr 9 i wyniosła 16% wartości szczytowej udaru. Wartości maksymalne napięć w pobliżu punktu gwiazdowego były zbliżone do konfiguracji, w których ekran zewnętrzny był odłączony uzwojenia bądź fizycznie zdemonstowany. Ponownie można zauważyć kluczowy wpływ podłączenia ekranu wewnętrznego na poziom napięć w całym uzwojeniu oraz mniejszą rolę ekranu zewnętrznego.



Rys. 7.16 Rozkład maksymalnych wartości napięć doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora: ekran wewnętrzny (EW) - odłączony od zacisku liniowego (pływający potencjał), ekran zewnętrzny (EZ) – brak

### 7.2.3 Porównanie wpływu ekranów na napięcia w uzwojeniu

W Tabelach 7.3 oraz 7.4 przedstawiono porównanie wpływu podłączenia, odłączenia bądź demontażu ekranów od uzwojenia wielowarstwowego, na wartości maksymalne napięć doziemnych. Porównane zostały maksymalne wartości napięć  $u_{xmax}$  panujące w punktach pomiarowych  $x$  zlokalizowanych w **połowie wysokości** warstw nr: 1, 6 oraz 11 (początek, środek, koniec uzwojenia). Tabela 7.3 zawiera zestawienie wartości maksymalnych napięć doziemnych w procentach, w odniesieniu do wartości szczytowej  $U$  doprowadzonego udaru

napięciowego, natomiast w Tabeli 7.4 przedstawiono procentowe różnice napięć pomiędzy wartościami maksymalnymi przepięć doziemnych  $u_{xmax}$  w uzwojeniu oraz idealnym rozkładem końcowym napięcia  $U_{xfin}$  w wybranych punktach pomiarowych  $x$  w uzwojeniu.

Tabela 7.3. Porównanie względnych wartości maksymalnych przepięć doziemnych w punktach pomiarowych zlokalizowanych w połowie warstw nr: 1, 6, 11

Konfiguracja	Ekran wewnętrzny	Ekran zewnętrzny	$u_{xmax}/U$ [%]		
			Warstwa nr 1	Warstwa nr 6	Warstwa nr 11
1	podłączony (HV)	podłączony (GND)	97	59	8
2	podłączony (HV)	odłączony (FP)	98	58	12
3	odłączony (FP)	podłączony (GND)	107	62	12
4	odłączony (FP)	odłączony (FP)	106	62	17
5	podłączony (HV)	-	100	57	18
6	odłączony (FP)	-	109	60	15

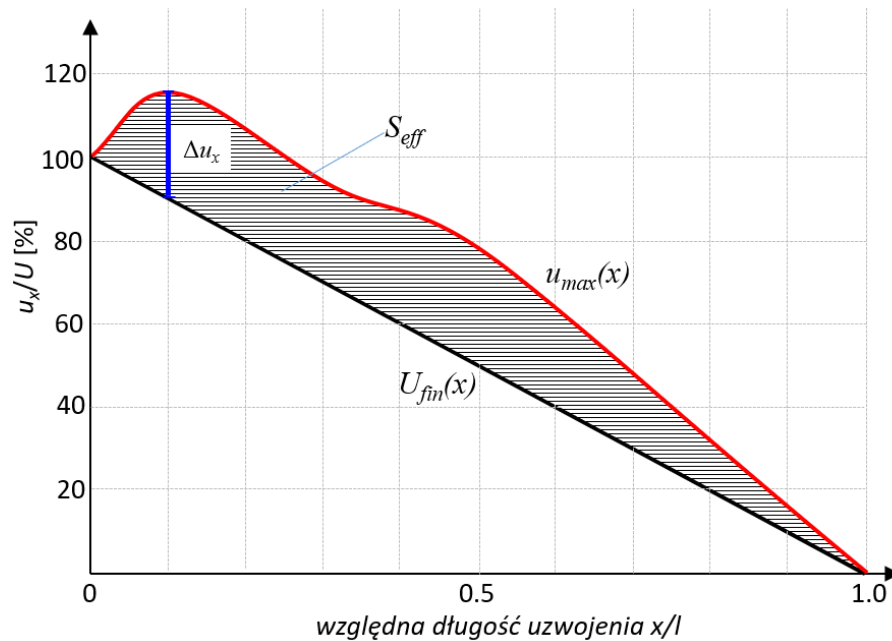
Tabela 7.4. Procentowe różnice pomiędzy wartościami przepięć maksymalnych, a rozkładem końcowym napięcia w punktach pomiarowych  $x$  zlokalizowanych w warstwach nr 1, 6, 11

Konfiguracja	Ekran wewnętrzny	Ekran zewnętrzny	$\Delta u_x = (u_{xmax} - U_{xfin})/U$ [%]		
			Warstwa nr 1	Warstwa nr 6	Warstwa nr 11
1	podłączony (HV)	podłączony (GND)	2	9	3
2	podłączony (HV)	odłączony (FP)	3	8	7
3	odłączony (FP)	podłączony (GND)	12	12	7
4	odłączony (FP)	odłączony (FP)	11	12	12
5	podłączony (HV)	-	5	7	13
6	odłączony (FP)	-	14	10	10

Na podstawie przedstawionego w Tabelach 7.3 i 7.4 porównania można stwierdzić, że najbardziej korzystną pod względem zagrożeń przepięciowych, jest konfiguracja z dwoma ekranami podłączonymi do uzwojenia – konfiguracja referencyjna. Odłączenie bądź fizyczne usunięcie ekranu zewnętrznego wpływa głównie na zwiększenie przepięć na końcu uzwojenia. Odłączenie ekranu wewnętrznego od zacisku liniowego jest znacznie bardziej niekorzystne i powoduje znaczący wzrost przepięć w całym uzwojeniu, w porównaniu do przypadku referencyjnego (Konfiguracja 1). Przepięcie rośnie w tym przypadku w pierwszej warstwie i propaguje w głąb uzwojenia, narażając izolację dalszych fragmentów uzwojenia. Najbardziej niekorzystnymi konfiguracjami uzwojenia były te z odłączonym ekranem wewnętrznym, w których ekran zewnętrzny nie był galwanicznie połączony z końcem uzwojenia. Nie miało większego znaczenia to, czy ekran zewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale, czy był fizycznie zdemontowany. Sprzężenie pojemnościowe ostatniej warstwy uzwojenia do odłączonego ekranu było na tyle małe, że fizyczne usunięcie ekranu z modelu, nie wpływało znacząco na zmianę narażeń przepięciowych układu izolacyjnego uzwojeń.

## 7.2.4 Ocena skuteczności ekranowania

W celu dokładniejszego, całościowego określenia efektywności ekranów w ograniczaniu przepięć, porównania poszczególnych konfiguracji i oceny wpływu polaryzacji ekranów względem uzwojenia na narażenia przepięciowe, zaproponowano kryterium najmniejszej różnicy pomiędzy rozkładem przepięć maksymalnych (obwiednią drgań maksymalnych), a rozkładem końcowym napięcia, określone za pomocą współczynnika skuteczności ekranowania  $S_{eff}$  (7.1). Graficzna reprezentacja tego współczynnika przedstawiona została na Rys. 7.17. Współczynnik  $S_{eff}$  określa pole powierzchni obszaru pomiędzy dwoma analizowanymi rozkładami napięcia – rozkładem przepięć maksymalnych oraz idealnym rozkładem końcowym napięcia w uzwojeniu.



Rys. 7.17 Graficzne przedstawienie współczynnika skuteczności ekranowania  $S_{eff}$

Założmy, że rozkład przepięć maksymalnych oraz rozkład końcowy napięcia są opisane odpowiednio funkcjami  $u_{max}(x)$  oraz  $U_{fin}(x)$ . Współczynnik  $S_{eff}$ , określający skuteczność ekranowania można zatem wyrazić za pomocą wyrażenia (7.1). Wartości napięć odpowiadających obu rozkładom, są wyrażane w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości szczytowej udaru piorunowego doprowadzonego do uzwojenia.

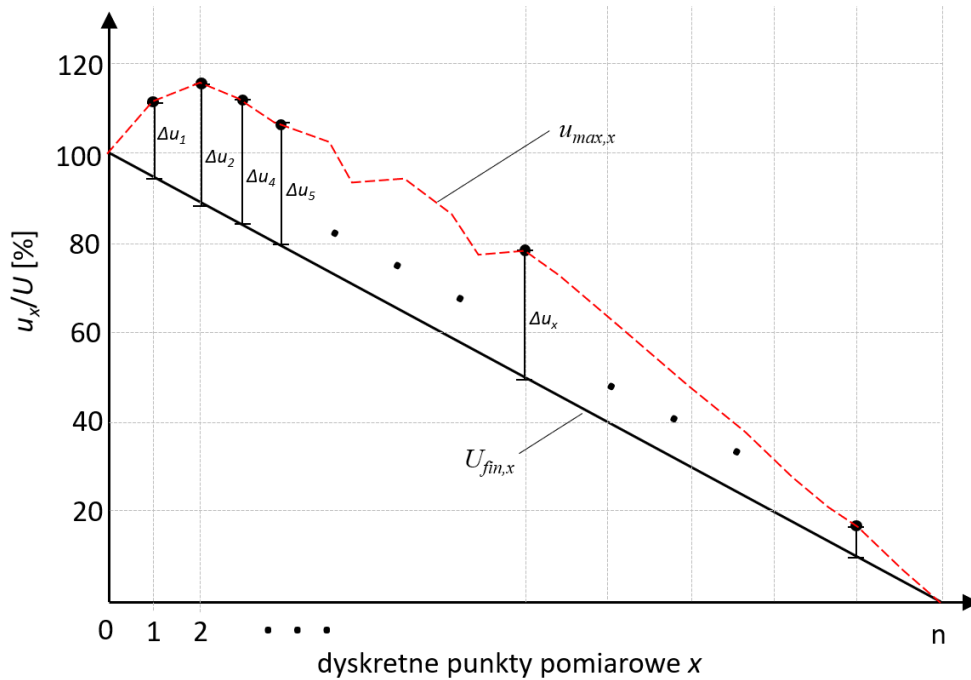
$$S_{eff} = \int_0^l [u_{max}(x) - U_{fin}(x)] dx \quad (7.1)$$

gdzie: -  $l$  – całkowita długość uzwojenia,

- $u_{max}(x)$  – funkcja opisująca względny rozkład przepięć maksymalnych w uzwojeniu,
- $U_{fin}(x)$  – funkcja opisująca względny rozkład napięcia końcowego w uzwojeniu.

Ze względu na fakt, że pomiary przepięć przeprowadzane były tylko w wybranych (dyskretnych) punktach uzwojenia, niemożliwe jest dokładne określenie pola obszaru pomiędzy wykresami. Aby porównać pomiędzy sobą poszczególne konfiguracje połączeń

ekranów z uzwojeniem, wprowadzona została zatem uproszczona, dyskretna forma parametru  $S_{eff}$ , jako suma procentowej różnicy napięć  $\Delta u_x$  (7.2) (Rys. 7.17), pomiędzy rozkładem przepięć maksymalnych ( $u_{max,x}$ ) oraz rozkładem końcowym ( $U_{fin,x}$ ), w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych na początku, w środku oraz na końcu każdej z warstw uzwojenia. Uproszczona wersja parametru  $S_{eff}$  została oznaczona jako  $S_{eff2}$  i jest wyrażona równaniem (7.3). Graficzne przedstawienie wyznaczania parametru  $S_{eff2}$  znajduje się na Rys. 7.18



Rys. 7.18 Graficzne przedstawienie współczynnika skuteczności ekranowania  $S_{eff2}$ ;  $u_{max,x}$  – obwiednia przepięć maksymalnych utworzona z dyskretnych punktów pomiarowych,  $U_{fin,x}$  – rozkład końcowy napięcia

$$\Delta u_x = u_{max,x} - U_{fin,x} [\%] \quad (7.2)$$

gdzie: -  $x$  – punkt pomiarowy w uzwojeniu,

-  $u_{max,x}$  – maksymalna zarejestrowana wartość napięcia w punkcie  $x$ ,

-  $U_{fin,x}$  – napięcie końcowe w punkcie  $x$ ,

-  $\Delta u_x$  – procentowa różnica napięć pomiędzy rozkładem przepięć maksymalnych, a rozkładem końcowym napięcia w punkcie  $x$ .

$$S_{eff2} = \Delta u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_2 + \dots + \Delta u_n = \sum_{x=0}^n \Delta u_x [\%] \quad (7.3)$$

gdzie: -  $n$  – liczba punktów pomiarowych w uzwojeniu (w analizowanym przypadku  $n=23$ ).

Im mniejsza wartość parametru  $S_{eff}$  oraz  $S_{eff2}$ , tym mniejsze jest pole obszaru pomiędzy rozkładem końcowym napięcia, a obwiednią przepięć maksymalnych i lepsza jest skuteczność ekranowania, to znaczy, że uzwojenie jest mniej narażone na negatywne skutki oddziaływania przepięć piorunowych. Porównanie skuteczności ekranowania w analizowanych

konfiguracjach połączeń uzwojenia i ekranów przedstawiono w Tabeli 7.5. Współczynnik  $S_{eff2}$  uwzględnił  $n=23$  punkty pomiarowe zlokalizowane w uzwojeniu.

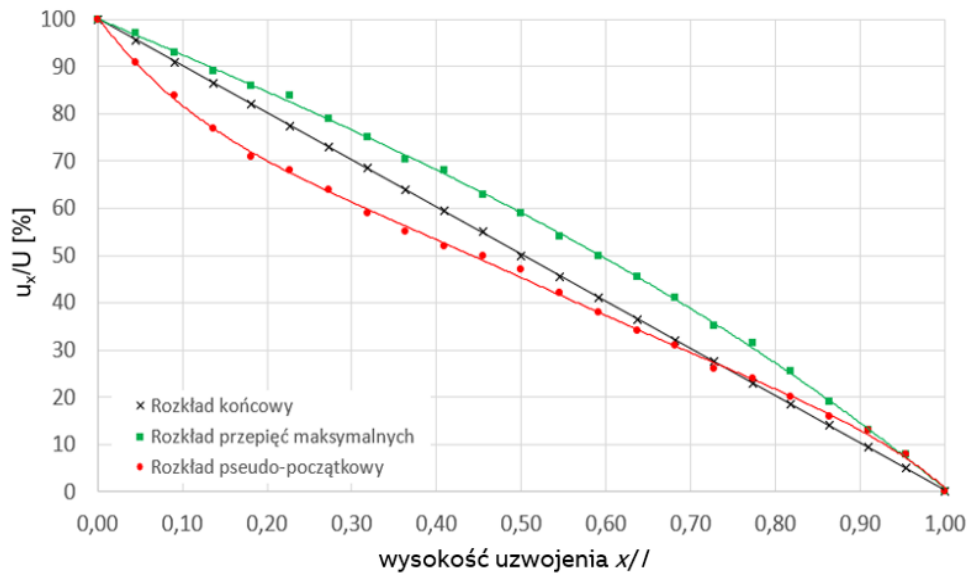
Tabela 7.5. Porównanie skuteczności ekranowania dla różnych konfiguracji połączeń uzwojenia i ekranów

Nr konfiguracji	Ekran wewnętrzny	Ekran zewnętrzny	Skuteczność ekranowania
			$S_{eff2}$ [%]
1	podłączony (HV)	podłączony (GND)	131
2	podłączony (HV)	odłączony (FP)	160
3	odłączony (FP)	podłączony (GND)	220
4	odłączony (FP)	odłączony (FP)	249
5	podłączony (HV)	-	167
6	odłączony (FP)	-	257

Analizując wartości parametru  $S_{eff2}$  można stwierdzić, że uzwojenie wielowarstwowe z dwoma ekranami podłączonymi do jego końców, cechuje się najlepszą skutecznością ekranowania i w rezultacie jest najbardziej odporne na działanie przepięć piorunowych. Najgorszy przypadek dotyczy uzwojenia, w którym ekran wewnętrzny znajduje się na pływającym potencjale, a ekran zewnętrzny jest fizycznie zdemontowany z modelu uzwojenia; chociaż odłączenie ekranu zewnętrznego od uzwojenia, bez jego fizycznego usunięcia, dało bardzo zbliżone rezultaty. Pozostałe konfiguracje zawierają się w przedziale pomiędzy wcześniej wymienionymi, skrajnymi przypadkami.

Wyraźnie widać, że podłączenie ekranu wewnętrznego do zacisku liniowego jest kluczowe dla poprawy odporności udarowej uzwojenia, natomiast połączenie ekranu zewnętrznego do uziemionego końca uzwojenia jest mniej istotne. Niemniej jednak, podłączenie ekranu zewnętrznego do uziemionego punktu gwiazdowego transformatora, poprawia rozkład przepięć w końcowej części uzwojenia przy oddziaływaniu przepięć piorunowych, dlatego zalecane jest jego stosowanie i zapewnienie pewnego galwanicznego połączenia z uzwojeniem.

Jak wykazała analiza rozkładu pseudo-początkowego (rozdział 7.2), współczynnik  $\alpha$  dla konfiguracji referencyjnej (oba ekrany podłączone do uzwojenia), mieści się w zakresie od 1,2 do 2, czyli jest bardzo korzystny i powinniśmy się spodziewać, że przepięcia piorunowe w uzwojeniu będą osiągać niewielkie wartości maksymalne. Potwierdziła to analiza maksymalnych przepięć, przeprowadzona w rozdziale 7.2.2, 7.2.3 i 7.2.4. Rozkład pseudo-początkowy i obwiednia maksymalnych przepięć w uzwojeniu referencyjnym przedstawione zostały na Rys. 7.19, na tle idealnego rozkładu końcowego.



Rys. 7.19 Porównanie rozkładu pseudo-początkowego, końcowego i obwiedni maksymalnych przebiegów w uzwojeniu referencyjnym

Rozkład pseudo-początkowy oraz rozkład przebiegów maksymalnych, wyznaczone dla analizowanego uzwojenia referencyjnego, są znacznie korzystniejsze niż w przypadku wielu, dobrze splecionych uzwojeń cewkowych. Wynika to bezpośrednio z bardzo korzystnego wpływu ekranów na zwiększenie pojemności szeregowej uzwojenia. Uzwojenia o konstrukcji cewkowej charakteryzują się stosunkowo dużą powierzchnią, od strony średnicy wewnętrznej, która jest silnie sprzężona z uziemionym w czasie prób uzwojeniem dolnego napięcia. W przypadku uzwojenia wielowarstwowego o konstrukcji przedstawionej na Rys. 7.2, pojemności doziemne pomiędzy uzwojeniami górnego i dolnego napięcia są skoncentrowane na powierzchni wewnętrznego ekranu elektrostatycznego, co praktycznie eliminuje pojemności doziemne w początkowych warstwach (z wyłączeniem pojemności skrajnych zwojów do jarzm). Początkowe warstwy uzwojenia są bardzo słabo sprzężone z uziemionymi elementami wewnątrz transformatora. Dlatego też, należy zwrócić szczególną uwagę na wykonanie poprawnego i niezawodnego połączenia między uzwojeniem i ekranami, aby nie utracić ich korzystnego wpływu na ograniczenie przebiegów. Szczególnie ważne jest zadbanie o połączenie ekranu z zaciskiem liniowym uzwojenia – jest to kluczowa kwestia dla zapewnienia bezpiecznej eksploatacji transformatora z uzwojeniami warstwowymi w kontekście zagrożeń piorunowych.

## 7.3 Wyznaczanie rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

W rozdziale 7.2 przedstawiona została eksperymentalna analiza rozkładu przepięć piorunowych w rzeczywistym uzwojeniu wielowarstwowym transformatora energetycznego. Na podstawie pomiarów charakterystyk czasowych przepięć w wybranych punktach uzwojenia wyznaczono rozkład pseudo-początkowy napięcia w uzwojeniu z podłączonymi dwoma ekranami elektrostatycznymi oraz rozkłady przepięć maksymalnych dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów względem uzwojenia. Jak wyjaśniono w rozdziale 5.4.1, rozkład pseudo-początkowy (w chwili  $t=1,2 \mu\text{s}$ ) nie odzwierciedla dokładnie rozkładu narażeń, jakim poddane jest uzwojenie w początkowej chwili doprowadzenia fali udarowej, ze względu na częściowe wyrównanie się rozkładu początkowego do chwili  $t=1,2 \mu\text{s}$ . W celu lepszego rozpoznania narażeń przepięciowych w uzwojeniu, panujących w początkowej chwili oddziaływania napięcia udarowego, analizę eksperymentalną rozszerzono o analizę symulacyjną rozkładu początkowego w uzwojeniu. Pozwoliło to dokładniej zobrazować różnice i porównać narażenia dla poszczególnych konfiguracji uzwojenia i ekranów. Dla porównania, przeanalizowano również uzwojenie bez ekranów elektrostatycznych (taka konfiguracja nie była badana eksperymentalnie, ze względu na brak możliwości usunięcia ekranu wewnętrznego). Przeprowadzone zostały obliczenia rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu metodą połową (metodą elementów skończonych). W obliczeniach założono, że początkowy rozkład napięcia występujący w uzwojeniu zaraz po pojawieniu się fali udarowej jest czysto pojemnościowy i odpowiada rozkładowi potencjału elektrostatycznego wynikającego z narzuconych warunków brzegowych, geometrii układu i danych materiałowych. Ze względu na zastosowane uproszczenia i fakt, że rozkład czysto pojemnościowy jest pojęciem teoretycznym, analizę tę należy traktować głównie jakościowo.

### 7.3.1 Model uzwojenia warstwowego i metodologia obliczeń

Obiektem analizy był rzeczywisty model uzwojeń jednej fazy transformatora energetycznego o napięciu 147 kV / 10,5 kV i mocy 63 MVA, o konstrukcji przedstawionej na Rys. 7.2. Rzeczywiste uzwojenie posiadało następujące elementy:

- makietę rdzenia w postaci zwoju blachy transformatorowej umieszczonej pod tuleją nawojową DN,
- uzwojenie DN – typu śrubowego zawierające 125 zwojów nawiniętych dwoma równoległymi promieniowo przewodami CTŻ,
- układ cylindrycznych barier wykonanych z twardego preszpanu, pomiędzy uzwojeniami dolnego i górnego napięcia,
- ekran wewnętrzny uzwojenia GN – w postaci pasów folii aluminiowej zwartych jednostronnie ze sobą; ekran był łączony lub odłączany od zacisku liniowego transformatora,



- uzwojenie GN – składające się z 11 warstw zawierających po 92 zwoje każda, nawiniętych przewodem w izolacji papierowej o dwustronnej grubości 0,8 mm. Odległości między kolejnymi warstwami wzdłuż promienia licząc od wewnątrz do zewnątrz uzwojenia wynosiły odpowiednio 5–4–4–3–3–3–3–3–3–3 mm,
- ekran zewnętrzny uzwojenia GN – o budowie analogicznej do ekranu wewnętrznego; ekran łączono albo odłączano od uziemionego końca uzwojenia, lub fizycznie usuwano.

Model symulacyjny został utworzony na podstawie rzeczywistych wymiarów geometrycznych i danych konstrukcyjnych uzwojenia. W geometrii analizowanego uzwojenia pominięte zostały bariery pomiędzy uzwojeniem górnego i dolnego napięcia, ze względu na ich brak wpływu na zmianę pojemności w uzwojeniu. Obliczenia przeprowadzono w programie *COMSOL Multiphysics ver.5.6 (AC/DC – Electrostatics)*, wykorzystując do tego celu model dwuwymiarowy o symetrii osiowej.

Praca obejmowała symulacje rozkładu potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu dla różnych konfiguracji połączeń uzwojenia z ekranami. Odległość ekranu wewnętrznego od pierwszej warstwy uzwojenia oraz ekranu zewnętrznego od ostatniej warstwy wynosiła 6 mm.

W modelu obliczeniowym uzwojenie było traktowane jako zbiór izolowanych od siebie pierścieni o potencjałach narzuconych warunkami brzegowymi, bądź wynikających z rozkładu pola elektrostatycznego w geometrii modelu. Każdy zwój stanowił w modelu oddzielną powierzchnię ekwipotencjalną. Wyjątek stanowiły skrajne zwoje sąsiadujących ze sobą warstw - aby uzyskać bliższy rzeczywistości rozkład potencjału, połączenia międzywarstwowe traktowano jako zwarcie, a nie jako przerwę. Zakładano, że potencjały skrajnych zwojów połączonych ze sobą warstw, wyrównują się na poziomie zbliżonym do ich średniej arytmetycznej, otrzymanej symulacyjnie dla układu bez połączeń międzywarstwowych (przykładowo dla połączenia warstw 2 i 3 od góry – potencjał ich skrajnych zwojów wynosi w przybliżeniu:  $(V_{2-1}+V_{3-1})/2$  V. Maksymalna obliczona odchyłka od tej średniej arytmetycznej była na poziomie 2,9%, co uznano za nieznaczącą dla całości analizy różnicę i w dalszej części zastosowano uproszczone podejście. Przykładowo, zwój ostatni warstwy pierwszej (1-92 – według oznaczeń z rozdziału 7.1 i Rys. 7.2) był połączony ze zwojem pierwszym warstwy drugiej (2-92 – pierwszy zwój licząc od dołu) i ich potencjały były jednakowe (znajdowały się na jednakowym pływającym potencjale – wspólny warunek brzegowy *Floating potential*). Podobnie, potencjały pierwszego i ostatniego zwoju w uzwojeniu oraz dołączonych do nich ekranów były narzucone przez odpowiednie warunki brzegowe, uwzględniające ich połączenie lub jego brak, w zależności od analizowanej konfiguracji (warunki brzegowe *Electric potential* i *Ground*). Zastosowane w symulacjach warunki brzegowe i parametry materiałowe przedstawiono graficznie na Rys. 7.20 – Rys. 7.22. Uwzględnienie międzywarstwowych połączeń pozwoliło na wierniejsze odwzorowanie rozkładu napięcia panującego na krańcach warstw przy wymuszeniu udarowym piorunowym. Pozostałe zwoje w uzwojeniu były ze sobą sprzężone pojemnościowo i znajdowały się na pływającym potencjale (warunek brzegowy *Floating potential group*), który wynikał z narzuconych w symulacji warunków brzegowych, parametrów materiałowych oraz geometrii. Charakterystyka poszczególnych warunków brzegowych zastosowanych w symulacjach została przedstawiona w rozdziale 6.2.

Układem referencyjnym było uzwojenie z podłączonymi dwoma ekranami elektrostatycznymi, jednym od strony warstwy wewnętrznej (początek uzwojenia) i drugim od strony warstwy zewnętrznej (koniec uzwojenia) (Rys. 7.21). Potencjały pierwszego zwoju pierwszej warstwy i ekranu wewnętrznego były jednakowe ( $V=V_0=1$  V – wartość przyjęta na potrzeby symulacji); podobnie zwój ostatni warstwy jedenastej oraz zewnętrzny ekran zostały wspólnie uziemione przez narzucenie im potencjału  $V=0$  V.

Pozostałe analizy dotyczyły konfiguracji przedstawionych w rozdziale 7.2 i uwzględniały połączenie lub jego brak, poszczególnych ekranów z uzwojeniem (Rys. 7.22). Analizowano wpływ ekranów na rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu oraz wynikające z niego narażenia izolacji uzwojenia wielowarstwowego. W obliczeniach przyjęto analogiczne podejście symulacyjne jak przedstawiono wcześniej, przykładowo: dla uzwojenia „częściowo” ekranowanego, jeden z ekranów przyjmował potencjał początku lub końca uzwojenia (np.  $V=V_0=1$  V), a drugi znajdował się na pływającym potencjale (*Floating potential*) lub był usunięty (brak ekranu).

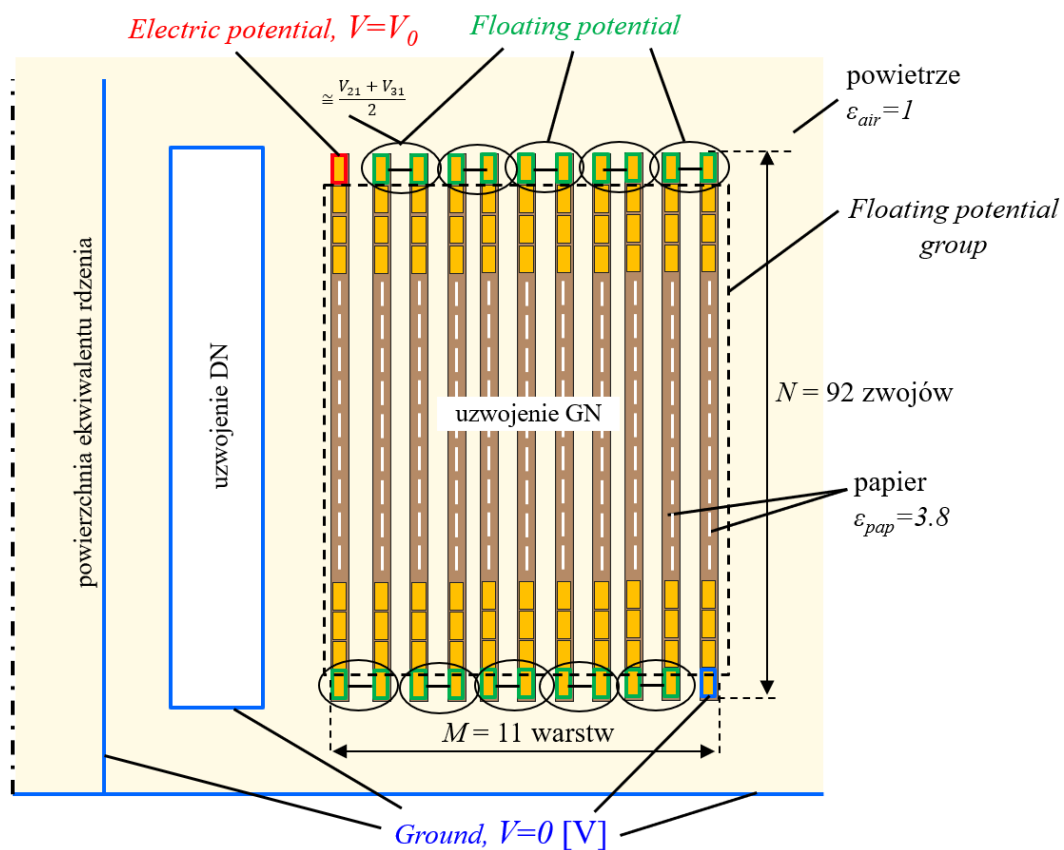
W celu dokładniejszej analizy wpływu ekranów na ograniczenie narażeń przepięciowych transformatora, przeprowadzono również symulację uzwojenia o jednakowej geometrii, ale bez ekranów elektrostatycznych (Rys. 7.20). W przypadku uzwojenia nieekranowanego:

- pierwszy zwój warstwy wewnętrznej znajdował się na potencjale  $V=V_0=1$  V,
- ostatni zwój warstwy zewnętrznej był uziemiony  $V=0$  V,
- pozostałe zwoje znajdowały się na tzw. pływającym potencjale (*Floating potential group*) wynikającym z przestrzennego rozkładu potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu,
- uwzględniono połączenia międzywarstwowe zgodnie z podejściem przedstawionym powyżej (wspólne dla poszczególnych par zwojów warunki *Floating potential*).

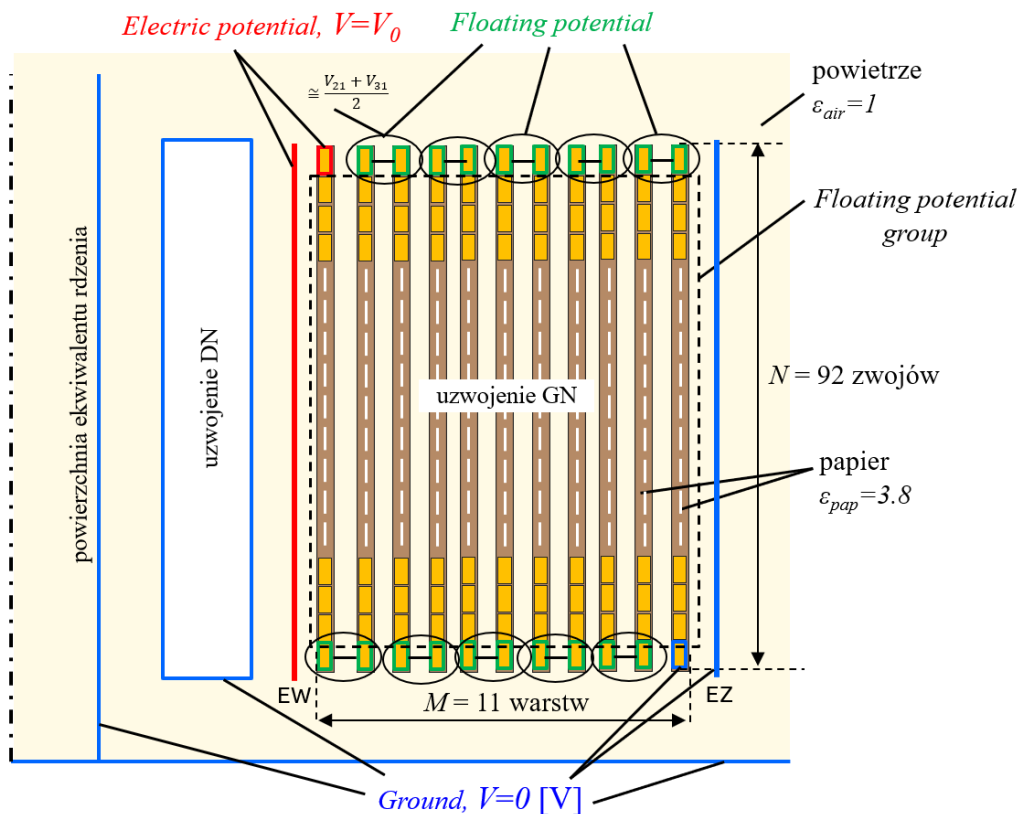
Graficzne przedstawienie warunków brzegowych i parametrów materiałowych zastosowanych w symulacjach zostało przedstawione odpowiednio:

- na Rys. 7.20 dla uzwojenia bez ekranów,
- na Rys. 7.21 dla uzwojenia z podłączonymi dwoma ekranami (przypadek referencyjny),
- na Rys. 7.22 dla uzwojenia „częściowo” ekranowanego - jeden ekran podłączony, drugi ekran na pływającym potencjale, lub jego brak.

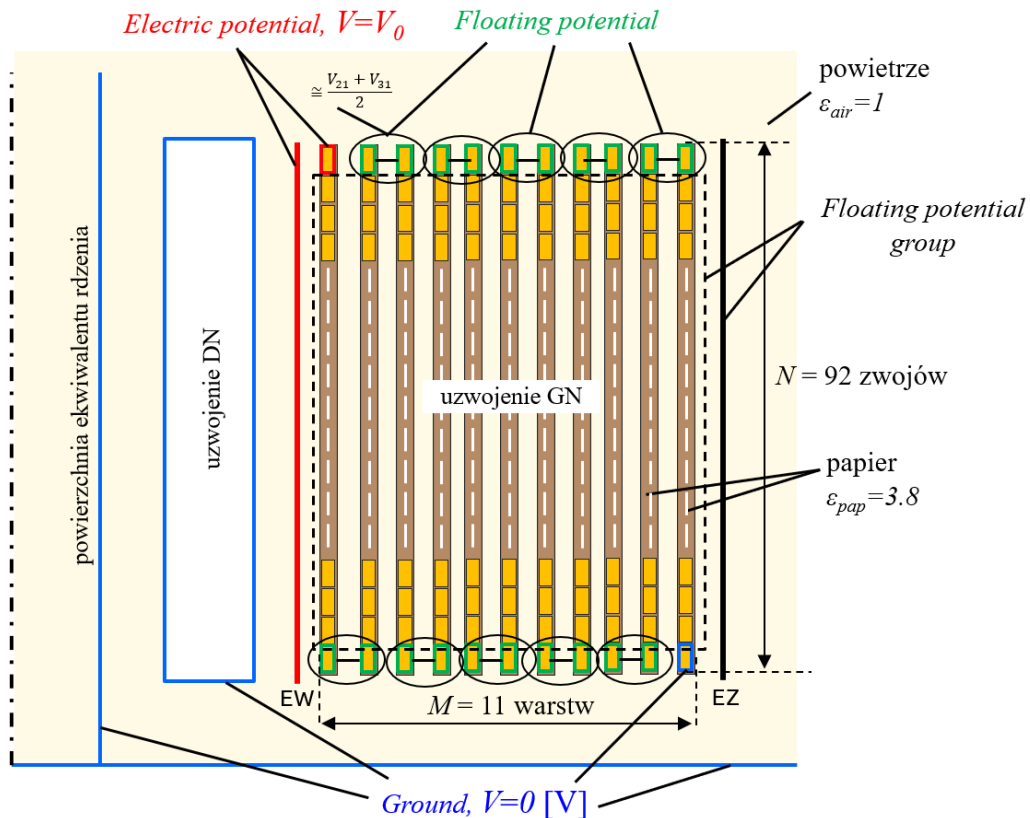
W symulacjach uwzględniono wpływ pojemności do uziemionych elementów, które były obecne w czasie pomiarów na rzeczywistym obiekcie – uzwojenia DN, makiety rdzenia, podłogi laboratorium. Uzwojenie DN traktowano jako uziemiony, wydrążony cylinder (powierzchnia ekwipotencjalna o  $V=0$  V), znajdujący się wewnątrz tulei uzwojenia GN.



Rys. 7.20 Warunki brzegowe i parametry materiałowe dla symulacji rozkładu potencjału elektrycznego w uzwojeniu warstwowym nieekranowanym



Rys. 7.21 Warunki brzegowe dla symulacji rozkładu potencjału elektrycznego w uzwojeniu warstwowym ekranowanym (EW, EZ – ekran wewnętrzny, zewnętrzny)



Rys. 7.22 Warunki brzegowe i parametry materiałowe dla symulacji rozkładu potencjału elektrycznego w uzwojeniu warstwowym częściowo ekranowanym (EW, EZ – ekran wewnętrzny, zewnętrzny) - ekran zewnętrzny na pływającym potencjale

Parametry materiałowe zastosowane w symulacjach odzwierciedlały warunki w jakich badane było uzwojenie. Określały one stałą dielektryczną materiałów izolacyjnych oraz ośrodka w jakim wykonywane były pomiary:

- powietrze:  $\epsilon_{air}=1$ ,
- papier:  $\epsilon_{pap}=3,8$ .

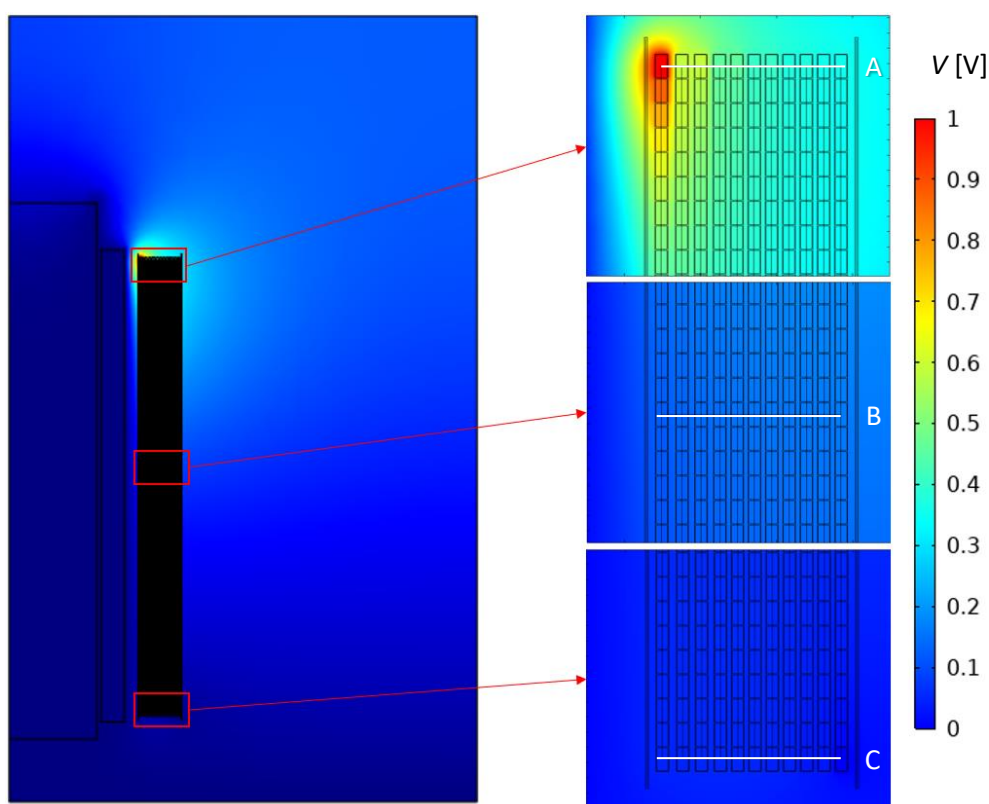
W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów względem uzwojenia.

### 7.3.2 Konfiguracja 0 – uzwojenie nieekranowane

Pierwszy przypadek dotyczył uzwojenia nieekranowanego. W symulacji, zwoje uzwojenia traktowane były jako izolowane pierścienie o potencjałach wynikających z narzuconych warunków brzegowych oraz geometrii układu. Poszczególne zwoje przyjmują zatem potencjały przecinających je linii ekwipotencjalnych. Pierwszy zwoj (licząc od góry) warstwy wewnętrznej znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast ostatni zwoj (dolny) warstwy zewnętrznej był uziemiony ( $V=0$  V). Wymuszenie o wartości 1 V przyjęto na potrzeby obliczeń, ze względu na łatwość odczytywania wyników w wartościach względnych  $V/V_0$  bez dodatkowych przeliczeń. Otrzymane wartości natężenia pola elektrycznego  $E$  są wyrażone w [V/m] dla jednostkowego wymuszenia potencjałem  $V_0$ . W celu oszacowania naprężeń dla

rzeczywistych wartości wymuszeń, należy otrzymane wartości  $E$  pomnożyć przez rzeczywistą wartość potencjału  $V_0$ , np. dla  $V_0=5$  kV, otrzymane wartości  $E$  należy przemnożyć przez 5000.

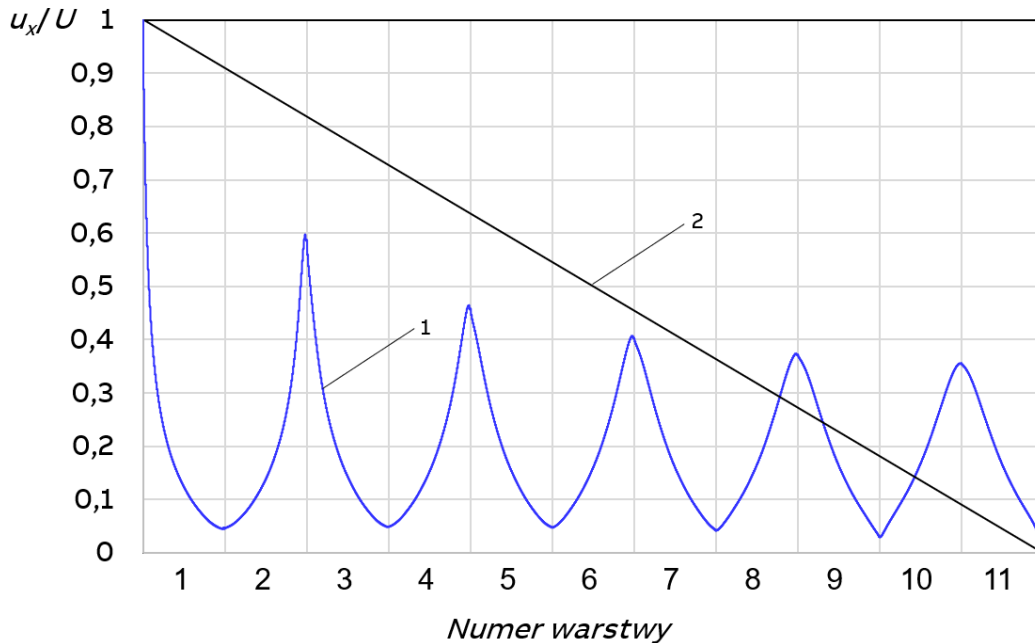
Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu bez ekranów, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów, od pierwszego, do ostatniego. Na Rys. 7.23 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Takie przedstawienie wyraźnie wskazuje na różnice w rozkładzie potencjałów panujących w górnej, dolnej i środkowej części uzwojenia. Górne krańce warstw uzwojenia znajdują się w silnym polu wytworzonym przez skrajny zwój pierwszej warstwy. W dolnej części uzwojenia, potencjały zwojów są bliskie potencjałowi ziemi, natomiast w części środkowej potencjały zwojów przyjmują wartości pośrednie pomiędzy górnym i dolnym obszarem uzwojenia.



Rys. 7.23 Rozkład potencjału elektrostatycznego w nieekranowanym uzwojeniu wielowarstwowym

Pojemnościowy rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2), odwzorowujący rozkład początkowy napięcia w analizowanym uzwojeniu, przedstawiony na tle idealnego rozkładu końcowego, jest silnie nieliniowy (Rys. 7.24). Wynika to z silnego sprzężenia pierwszej warstwy uzwojenia (na całej wysokości) z uziemionym uzwojeniem DN (ze względu na brak ekranu wewnętrznego). Można zauważyć bardzo duże gradienty napięć występujące wzdłuż warstw uzwojenia (na ich izolacji wzdłużnej). Szczególnie jest to widoczne w pierwszej warstwie, co każe oczekiwać znacznych przepięć międzyzwojowych. Największy gradient potencjału panuje pomiędzy dwoma pierwszymi zwojami w warstwie pierwszej, do której doprowadzony jest potencjał  $V_0$ . Potwierdza to również rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia

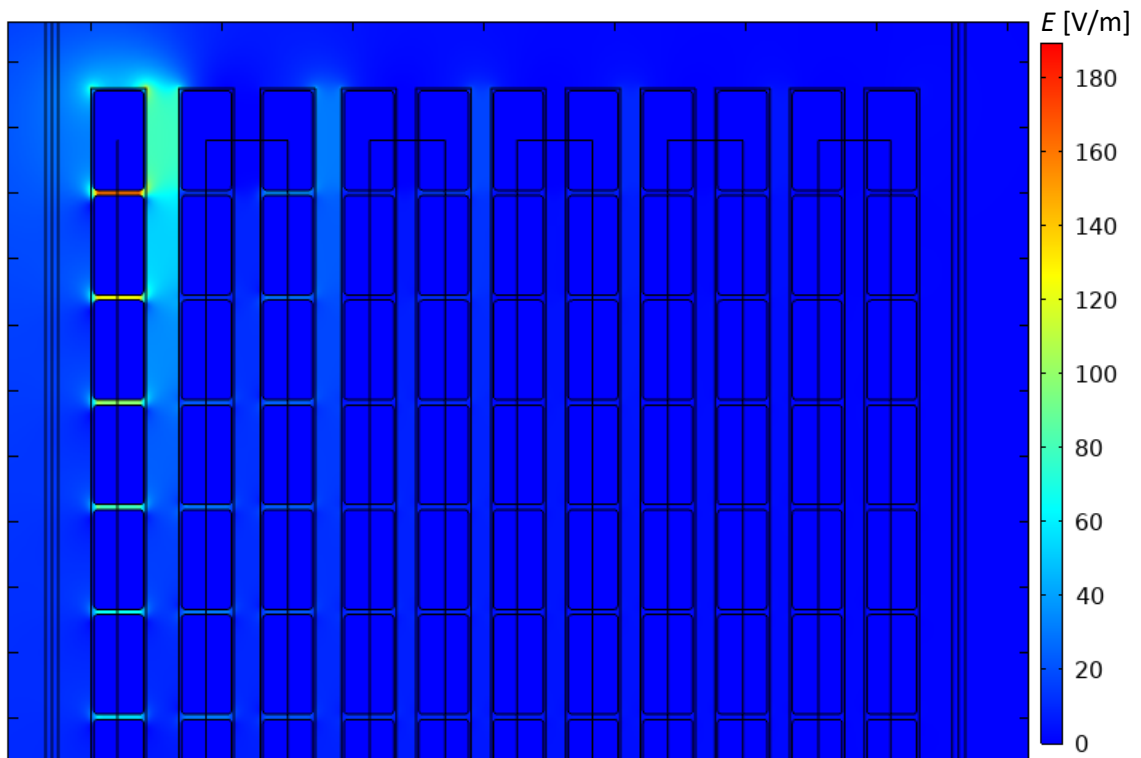
przedstawiony na Rys. 7.25. Można również zauważyć, że naprężenia elektryczne maleją wraz z oddalaniem się od pierwszego zwoju w uzwojeniu. Naprężenia międzywarstwowe są największe pomiędzy pierwszą i drugą warstwą w górnym obszarze uzwojenia. Naprężenia pomiędzy kolejnymi warstwami są znacznie mniejsze i maleją wraz z oddalaniem się od początku uzwojenia i zbliżaniem do jego końca.



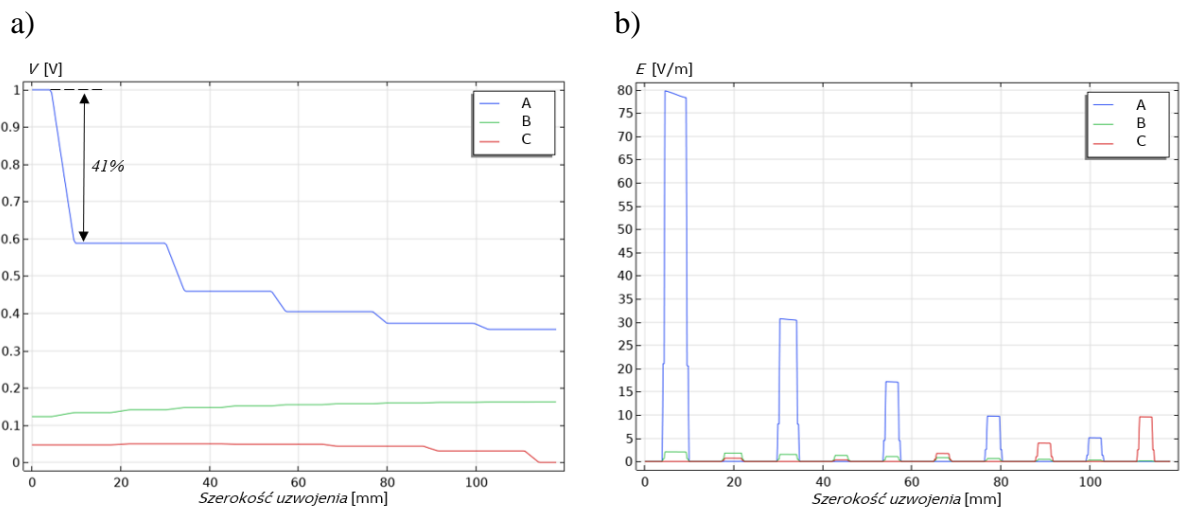
Rys. 7.24 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (linia zielona na Rys. 7.2) w uzwojeniu warstwowym nieekranowanym z Rys. 7.23; 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy

Rozkład początkowy potencjału znacząco odbiega od liniowego rozkładu końcowego. Takie różnice mogą prowadzić do powstania w uzwojeniu przebiegów wyrównawczych o bardzo dużych wartościach maksymalnych. Niemniej jednak, jak dowodzą [138], uzwojenia warstwowe nieekranowane cechują się odmiennym mechanizmem zjawisk, niż ten znany z uzwojeń cewkowych. Według autorów [138] w rzeczywistym uzwojeniu nieekranowanym, powstawanie i wyrównywanie się nierównomiernego rozkładu początkowego napięcia w kierunku rozkładu końcowego zachodzi równocześnie w małoindukcyjnym obwodzie uzwojenia. To, które z tych zjawisk będzie dominujące, jest zależne od stromości udaru i konstrukcji transformatora. Z tego względu, rozkład pseudo-początkowy otrzymany dla udaru o skończonej stromości może znacząco różnić się od klasycznego rozkładu pojemnościowego (Rys. 5.17). Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia pomiarów na uzwojeniu nieekranowanym, powyższe stwierdzenia nie mogły zostać zweryfikowane eksperymentalnie.

Na Rys. 7.26 przedstawiono rozkłady potencjału oraz natężenia pola elektrycznego wykreślone wzdłuż trzech poziomych linii przecięcia *A*, *B* i *C* przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku oraz na dole uzwojenia (przedstawione na Rys. 7.23).



Rys. 7.25 Rozkład natężenia pola elektrycznego w górnym obszarze uzwojenia



Rys. 7.26 Rozkład potencjału (a) i natężenia pola elektrycznego (b) wzdłuż linii przecięcia A, B, C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole (Rys. 7.23)

Różnica potencjału pomiędzy skrajnymi górnymi zwojami pierwszej i drugiej warstwy wynosi około 41% wartości szczytowej narzuconego potencjału (Rys. 7.26a). Porównywalny spadek potencjału występuje w obrębie pierwszych sześciu zwojów pierwszej warstwy (Rys. 7.23). Różnice potencjałów pomiędzy górnymi skrajami kolejnych warstw maleją wraz z oddalaniem się od warstwy wewnętrznej i w okolicach ostatnich warstw są niemal jednakowe (linia A na Rys. 7.26). Największych przepięć międzywarstwowych można się zatem spodziewać pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami u góry uzwojenia, co potwierdza również rozkład naprężeń elektrycznych wyznaczony wzdłuż linii A i przedstawiony na Rys. 7.26b.

Potencjał dolnych krańców warstw uzwojenia (linia C) jest na poziomie 5% wartości potencjału wymuszającego i nieznacznie maleje wraz z oddalaniem się od pierwszej warstwy, ale różnice potencjałów panujące na poszczególnych kanałach międzywarstwowych są niewielkie. W dolnej części uzwojenia, największe naprężenia elektryczne (Rys. 7.26b) panują pomiędzy warstwą 10 i 11, ale są one ośmiokrotnie mniejsze, niż naprężenia panujące pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami u góry uzwojenia.

Potencjały panujące na środkowych zwojach poszczególnych warstw są zbliżone i nieznacznie rosną począwszy od pierwszej do ostatniej warstwy (linia B na Rys. 7.23 i Rys. 7.26a). W połowie wysokości uzwojenia nie należy spodziewać się zatem przepięć zagrażających izolacji międzywarstwowej. Natężenie pola elektrycznego panujące w kanałach międzywarstwowych w połowie wysokości uzwojenia przyjmuje niewielkie wartości (Rys. 7.26b – linia B).

Podsumowując należy stwierdzić, że fragment uzwojenia wielowarstwowego nieekranowanego, znajdujący się w pobliżu atakowanego udarem zacisku liniowego, jest krytyczny pod względem zagrożeń przepięciowych i oddziaływania pola elektrycznego o znacznych natężeniach, narażających zarówno izolację międzyzwojową, jak i międzywarstwową. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części transformatora w przypadku stosowania tego typu konstrukcji.

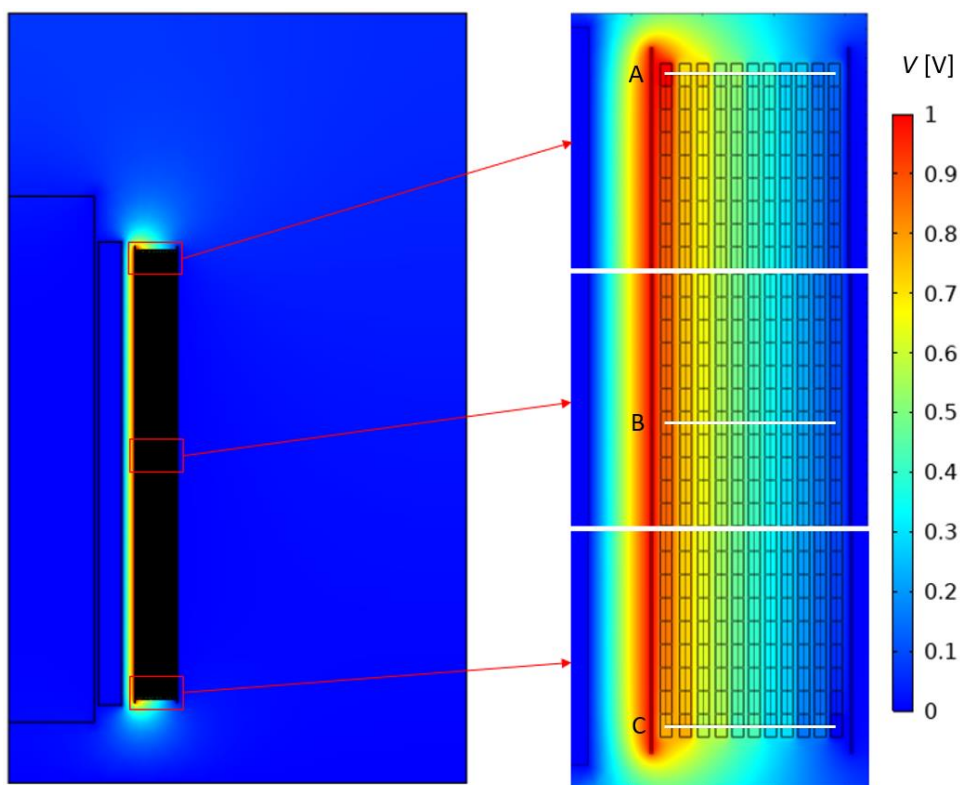
### 7.3.3 Konfiguracja 1 – uzwojenie w pełni ekranowane

Obecna konfiguracja dotyczy uzwojenia w pełni ekranowanego – ekran wewnętrzny jest dołączony do początku uzwojenia (pierwszy zwój warstwy pierwszej) i znajdują się one na wspólnym potencjale  $V_0=1$  V; ekran zewnętrzny jest uziemiony, podobnie jak ostatni zwój w uzwojeniu ( $V=0$  V). W symulacji uwzględniono wpływ połączeń międzywarstwowych, jak wyjaśniono w rozdziale 7.3.1. Pozostałe zwoje były traktowane jak izolowane pierścienie znajdujące się na pływających potencjałach wynikających z warunków symulacyjnych.

Obliczony został rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu ekranowanym, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.27 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.

W analizowanym przypadku, nie widać istotnych różnic w rozkładzie potencjału elektrycznego obrębie górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Jest to podyktowane obecnością ekranów, które narzucają bardzo równomierny rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu. Różnice można zaobserwować jedynie w obrębie kilku początkowych i końcowych zwojów na górnych i dolnych skrajach warstw uzwojenia, szczególnie w okolicach połączeń międzywarstwowych, co wynika z efektów krawędziowych (jest to znacznie lepiej widoczne na Rys. 7.28). W pozostałej części uzwojenia potencjał przyjmuje równomierne wartości wzdłuż poszczególnych warstw (potencjał zwojów jest prawie identyczny wzdłuż całej długości warstw i maleje lub rośnie jedynie na ich skrajach).

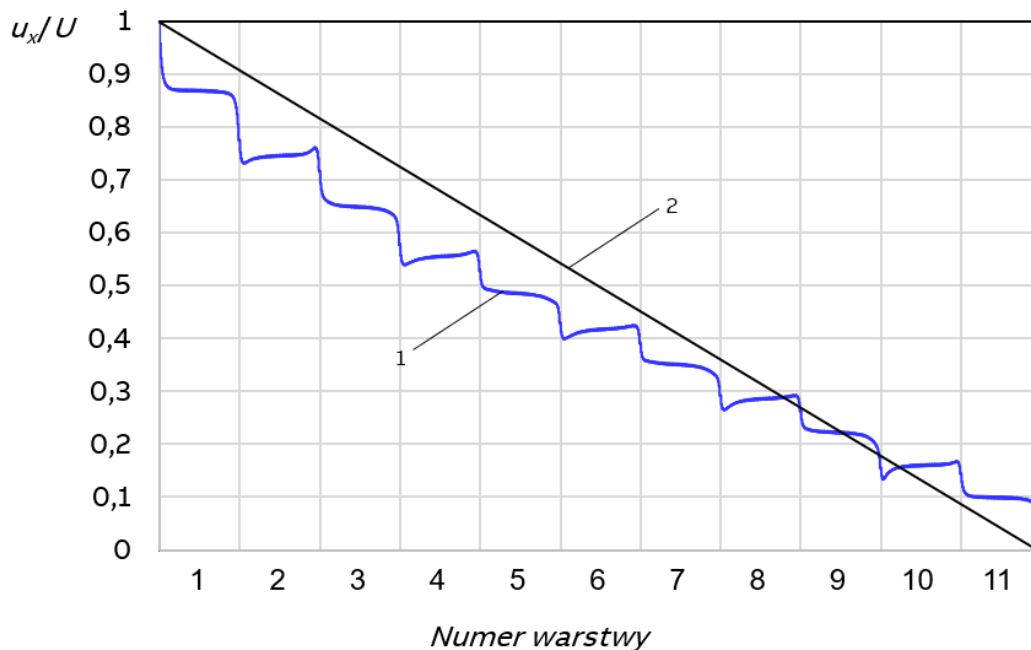




Rys. 7.27 Rozkład potencjału elektrostatycznego w ekranowanym uzwojeniu wielowarstwowym

Początkowy rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2), przedstawiony na Rys. 7.28, jest linią falistą z widocznymi wzrostami oraz spadkami potencjału na skrajach warstw, w pobliżu połączeń międzywarstwowych. Patrząc całościowo na przedstawiony rozkład można stwierdzić, że niewiele odbiega on od linii prostej oznaczającej idealny rozkład końcowy. Na początkowych dziesięciu zwojach pierwszej warstwy potencjał spada ze 100% do 87% wartości maksymalnej, następnie utrzymuje się na tym poziomie wzdłuż niemal całej warstwy i zaczyna opadać dopiero na kilku ostatnich zwojach, w pobliżu połączenia z warstwą drugą (w dolnej części), na którym następuje wyrównanie potencjałów ich skrajnych zwojów. Na dolnym skraju warstwy drugiej, jej potencjał jest najniższy, a następnie nieznacznie wzrasta i utrzymuje się na niemal stałym poziomie, aż do górnego skraju warstwy, na którym potencjał połączenia międzywarstwowego warstwy drugiej i trzeciej ponownie nieznacznie wzrasta. Analogicznie, niemal stały rozkład potencjału wzdłuż środkowych części warstw oraz wzrosty i spadki potencjałów na skrajnych zwojach, można zaobserwować w dalszej części uzwojenia. Na dolnych skrajach warstw obserwuje się spadki potencjału (ze względu na bliskość potencjału ziemi), a na górnych wzrosty (ze względu na bliskość pierwszego zwoju znajdującego się na wysokim potencjale).

Otrzymany w symulacji początkowy rozkład potencjału jest bardzo korzystny i oznacza, że wpływ pojemności doziemnej do uzwojenia DN (widoczny w przypadku uzwojenia nieekranowanego) został wyeliminowany. W obecnej konfiguracji, sprzężenie pojemnościowe do ziemi przejął wewnętrzny ekran, znajdujący się na potencjale początku uzwojenia, jednocześnie ekranując samo uzwojenie (szczególnie pierwszą warstwę) od wpływu negatywnych skutków pojemności do uziemionego uzwojenia DN.

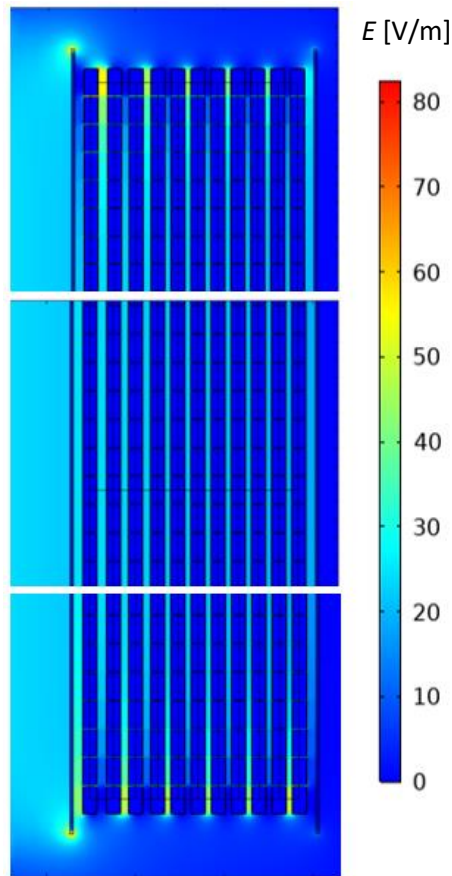


Rys. 7.28 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) uzwojenia warstwowego ekranowanego z Rys. 7.27; 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy

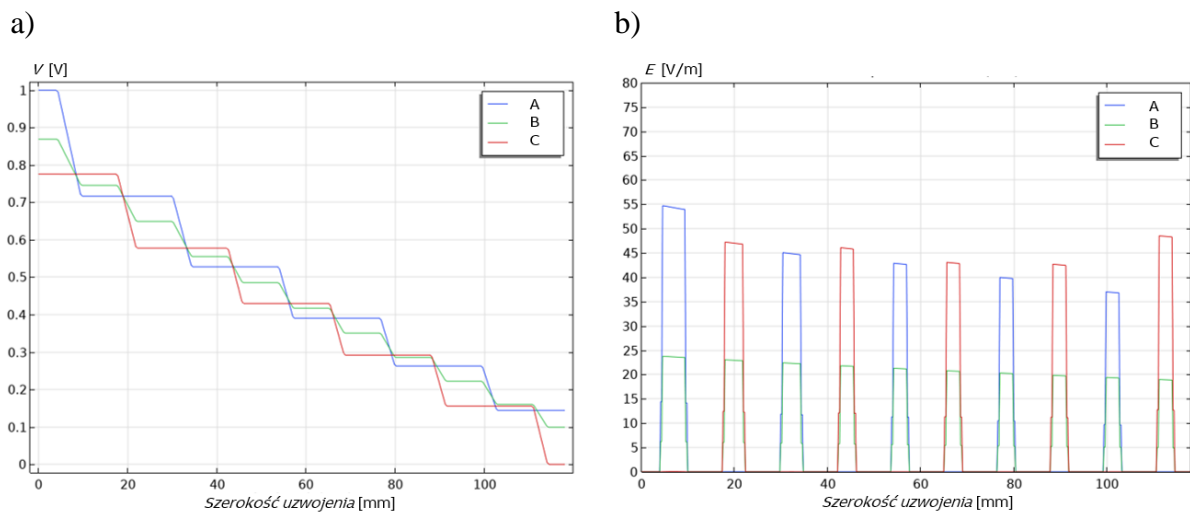
Największe gradienty potencjału są obserwowane na początku pierwszej i na końcu ostatniej warstwy uzwojenia, ale są one niewielkie w porównaniu do uzwojenia nieekranowanego. Nie należy się zatem spodziewać zagrażających izolacji przepięć międzywarstwowych, ani dużych naprężeń elektrycznych na izolacji zwojowej, co potwierdza rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawiony na Rys. 7.29.

Na Rys. 7.30 przedstawiono rozkład potencjału i pola elektrycznego wykreślony wzdłuż trzech poziomych linii przecięć *A*, *B*, *C* (Rys. 7.27) przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku oraz na dole uzwojenia. Różnice potencjałów pomiędzy poszczególnymi warstwami na górze (linia *A*) i na dole uzwojenia (linia *C*) są bardzo podobne, co oznacza, że izolacja międzywarstwowa jest naprężana niemal równomiernie w całym uzwojeniu (Rys. 7.30a), co jest dużą zaletą w porównaniu do uzwojenia nieekranowanego (Rys. 7.26a). Niemniej jednak, widoczna jest nieco większa różnica potencjałów pomiędzy pierwszą i drugą oraz trzecią i czwartą warstwą uzwojenia (na górze), niż pomiędzy kolejnymi warstwami. Wynika to z zastosowanych szerszych kanałów chłodzących (5mm i 4mm, zamiast 3mm), co osłabiło sprzężenie pojemnościowe pomiędzy tymi warstwami. Potwierdzają to również rozkłady naprężeń elektrycznych na górze, w środku i na dole uzwojenia przedstawione na Rys. 7.29 i Rys. 7.30b (wzdłuż linii *A*, *B*, *C*).

W środkowej części uzwojenia (linia *B*), naprężenia elektryczne są najmniejsze i są rozłożone bardzo równomiernie pomiędzy warstwami uzwojenia. Maksymalne naprężenia elektryczne na izolacji międzyzwojowej i międzywarstwowej są znacznie mniejsze niż w przypadku uzwojenia nieekranowanego.



Rys. 7.29 Rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia ekranowanego

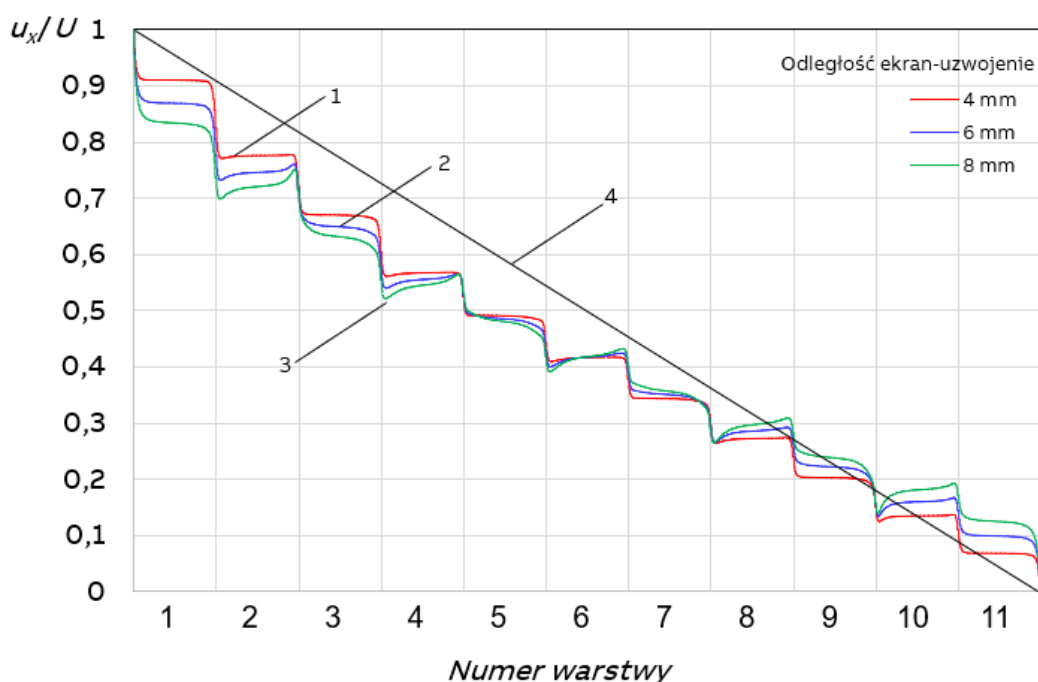


Rys. 7.30 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć A, B i C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole (Rys. 7.27)

Rozkład początkowy napięcia przedstawiony na Rys. 7.28 nieznacznie odbiega od liniowego rozkładu końcowego, zatem w uzwojeniu nie należy spodziewać się powstania przebiegów wyrównawczych o dużych wartościach szczytowych, co potwierdzają wyniki pomiarów napięć maksymalnych na rzeczywistym uzwojeniu o takiej samej konfiguracji (Rys. 7.11). Pseudo-początkowy rozkład napięcia w rzeczywistym uzwojeniu, wykreślony na

podstawie przebiegów napięć zarejestrowanych na początkowych, końcowych i środkowych zwojach warstw jest, co do ogólnego kształtu, bardzo zbliżony do rozkładu potencjału elektrostatycznego otrzymanego w analizowanej symulacji.

Początkowy rozkład potencjału elektrycznego w ekranowanym uzwojeniu wielowarstwowym jest bardzo korzystny, ale należy pamiętać, że silnie zależy od sprzężenia pojemnościowego uzwojenia i ekranów. Sprzężenie to można wzmocnić lub osłabić zmieniając odległość ekranów od uzwojenia. Na Rys. 7.28 przedstawiono rozkład potencjału wzdłuż uzwojenia dla odległości ekranów od uzwojenia wynoszącej 6 mm (po obu stronach uzwojenia). Porównanie rozkładów potencjału dla uzwojenia ze zmniejszoną do 4 mm i zwiększoną do 8 mm odległością uzwojenie-ekrany przedstawiono na Rys. 7.31.



Rys. 7.31 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż uzwojenia warstwowego ekranowanego dla różnych odległości pomiędzy ekranem wewnętrznym i zewnętrznym i przyległymi do niego warstwami uzwojenia: 1 – 4/4 mm, 2 – 6/6 mm, 3 – 8/8 mm, 4 – rozkład końcowy

Zmniejszenie odległości pomiędzy ekranami i uzwojeniem do 4 mm poprawia sprzężenie pojemnościowe na początku i na końcu uzwojenia przez co rozkład potencjału jest bardziej równomierny i zbliżony do rozkładu końcowego. Analogicznie, zwiększenie odległości ekranów i uzwojenia do 8 mm, powoduje pogorszenie rozkładu początkowego i odsunięcie go od rozkładu końcowego. Istotne jest, że wpływ zmiany odległości ekranów od uzwojenia jest bardzo widoczny w obrębie początkowych i końcowych trzech warstw uzwojenia (warstwy 1-3 i 9-11). W warstwach o nr 4 oraz 8, ten wpływ jest znacznie mniejszy, a w środku uzwojenia (warstwy 5-7) praktycznie zanika.

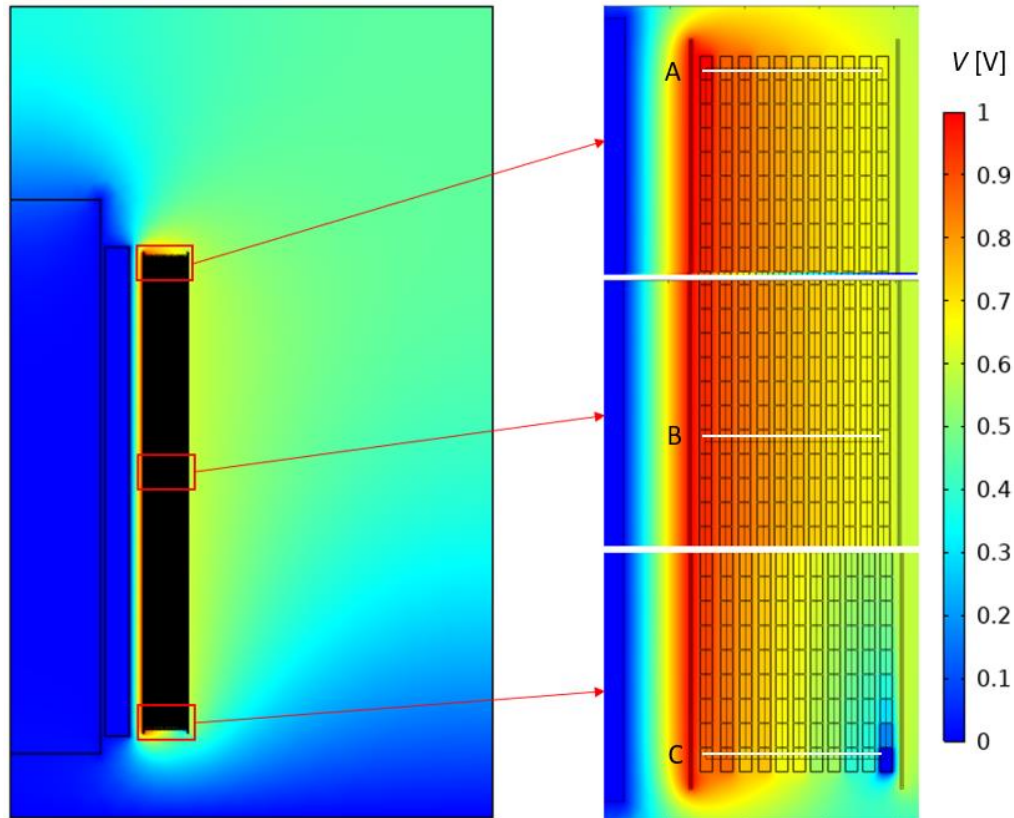
Podsumowując należy stwierdzić, że ekrany elektryczne podłączone do początku i końca uzwojenia wielowarstwowego, determinują w nim rozkład początkowy potencjału i znacząco wpływają na ograniczenie napięć narażających izolację uzwojenia. W analizowanym przypadku, największe zagrożenia dotyczyły izolacji pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami, w pobliżu początku uzwojenia, ale wynikało to w dużej mierze ze

zwiększonej szerokości kanału chłodzącego pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami. W przypadku zastosowania jednakowych odległości międzywarstwowych, naprężenia międzywarstwowe rozłożone będą bardziej równomiernie. Kluczowy jest również dobór odpowiedniej odległości ekranów od uzwojenia w celu zapewnienia odpowiednio silnego sprzężenia pojemnościowego.

### 7.3.4 Konfiguracja 2 – ekran wewnętrzny - podłączony, ekran zewnętrzny - odłączony

Analizowana konfiguracja dotyczy uzwojenia, w którym ekran wewnętrzny znajduje się na potencjale  $V_0=1$  V (jest dołączony do początku uzwojenia), a ekran zewnętrzny znajduje się na pływającym potencjale (brak galwanicznego połączenia z uziemionym końcem uzwojenia). W symulacji uwzględniono wpływ połączeń międzywarstwowych, jak wyjaśniono w rozdziale 7.3.1. Pozostałe zwoje były traktowane jako izolowane od siebie pierścienie znajdujące się na pływającym potencjale każdy.

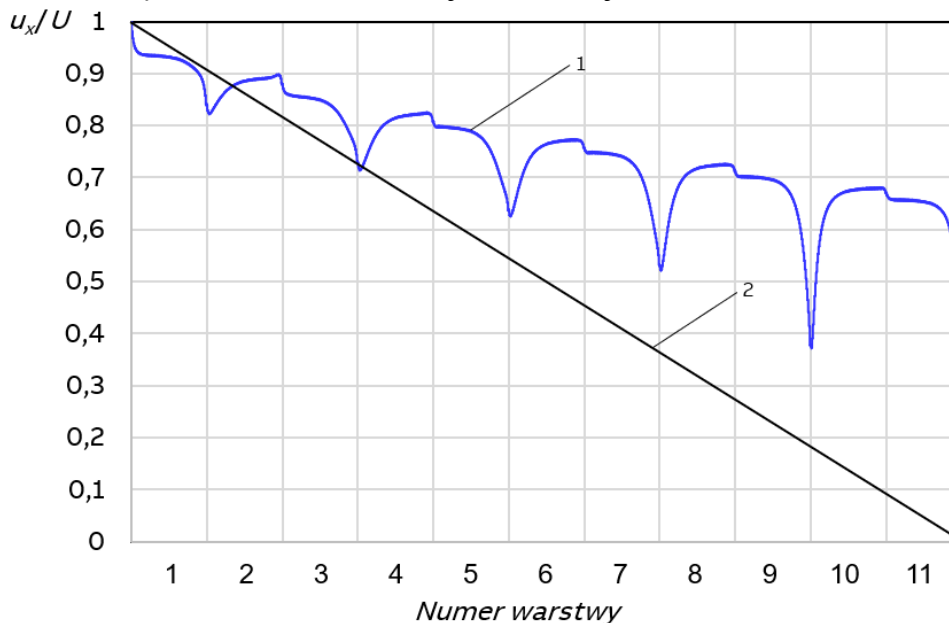
W przeprowadzonej symulacji obliczony został rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wyznaczono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.32 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w całym modelu obliczeniowym oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.



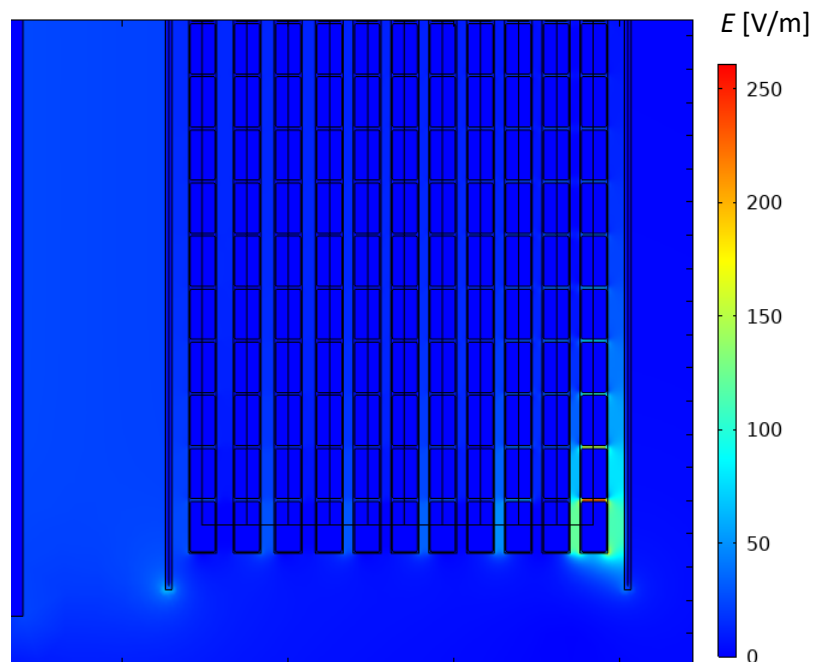
Rys. 7.32 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym z dwoma ekranami – ekran wewnętrzny - wysoki potencjał, ekran zewnętrzny – pływający potencjał

W analizowanym przypadku, można zauważyć znaczne różnice w obrazie rozkładu potencjału elektrostatycznego w różnych obszarach uzwojenia, szczególnie w jego górnej, i dolnej części (Rys. 7.32). W środku uzwojenia obraz potencjału jest zbliżony do tego panującego w górnej jego części. Wynika to z warunków jakie stwarzają w uzwojeniu oba ekrany. Potencjał ekranu zewnętrznego jest na poziomie 59% potencjału panującego na ekranie wewnętrznym. Zwoje znajdujące się pomiędzy tymi ekranami, w górnej i środkowej części uzwojenia, znajdują się na potencjałach pomiędzy tymi dwoma skrajnymi wartościami. W dolnej części uzwojenia ujawnia się już wpływ uziemionego końca warstwy jedenastej, który zmienia rozkład potencjału elektrostatycznego w tym obszarze i prowadzi do znacznych gradientów potencjału w okolicach końca uzwojenia.

Odłączenie zewnętrznego ekranu od uziemionego końca uzwojenia spowodowało osłabienie sprzężenia pojemnościowego ekranu z ostatnią warstwą i doprowadziło do powstania nietypowego pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu, przedstawionego na Rys. 7.33. Rozkład ten jest nieliniowy i w odróżnieniu od poprzednich przypadków, w przeważającym stopniu znajduje się on powyżej linii rozkładu końcowego. W obrębie pierwszej warstwy rozkład początkowy jest zbliżony do rozkładu końcowego, ale wraz z oddalaniem się od pierwszej warstwy, odbiega od niego coraz bardziej, prowadząc do znacznych gradientów potencjału w ostatniej warstwie uzwojenia. W rezultacie, w końcowym obszarze uzwojenia, izolacja międzyzwojowa i międzywarstwowa jest poddawana naprężeniom o znacznych wartościach maksymalnych (Rys. 7.34 i Rys. 7.35b), co prowadzi do powstania sytuacji zagrażającej izolacji uzwojenia transformatora. Największe naprężenia panują pomiędzy dwoma ostatnimi zwojami w uzwojeniu, gdzie gradient potencjału jest największy. Warto zauważyć, że potencjał spada z wartości 67% wartości maksymalnej do zera zaledwie w obrębie kilku ostatnich zwojów w uzwojeniu.

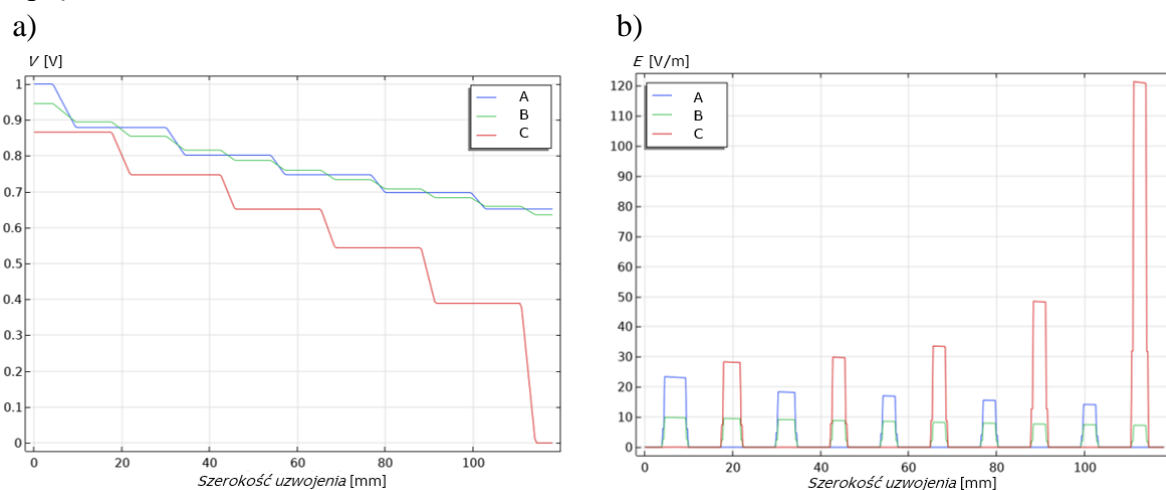


Rys. 7.33 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu warstwowym z ekranem wewnętrznym na wysokim, a zewnętrznym na pływającym potencjale (Rys. 7.32); 1 – rozkład początkowy i 2 – końcowy



Rys. 7.34 Rozkład natężenia pola elektrycznego w dolnej części uzwojenia warstwowego z ekranem wewnętrznym na wysokim, a zewnętrznym na pływającym potencjale

Na Rys. 7.35 przedstawiono rozkład potencjału i pola elektrycznego wykreślony poziomo, wzdłuż trzech linii przecięć A, B, C (Rys. 7.32) przechodzących przez wszystkie warstwy odpowiednio u góry, w środku oraz na dole uzwojenia. Rozkłady potencjału w górnej (linia A) i środkowej (linia B) części uzwojenia są zbliżone (Rys. 7.35a), natomiast rozkład w dolnej części (linia C) jest silnie nierównomierny, co powoduje również powstanie znacznych i nierównomiernych naprężeń międzywarstwowych na dole uzwojenia (Rys. 7.35b – linia C). Izolacja międzywarstwowa w górnej i środkowej części uzwojenia nie jest silnie naprężana.



Rys. 7.35 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć A, B i C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole uzwojenia (Rys. 7.32)

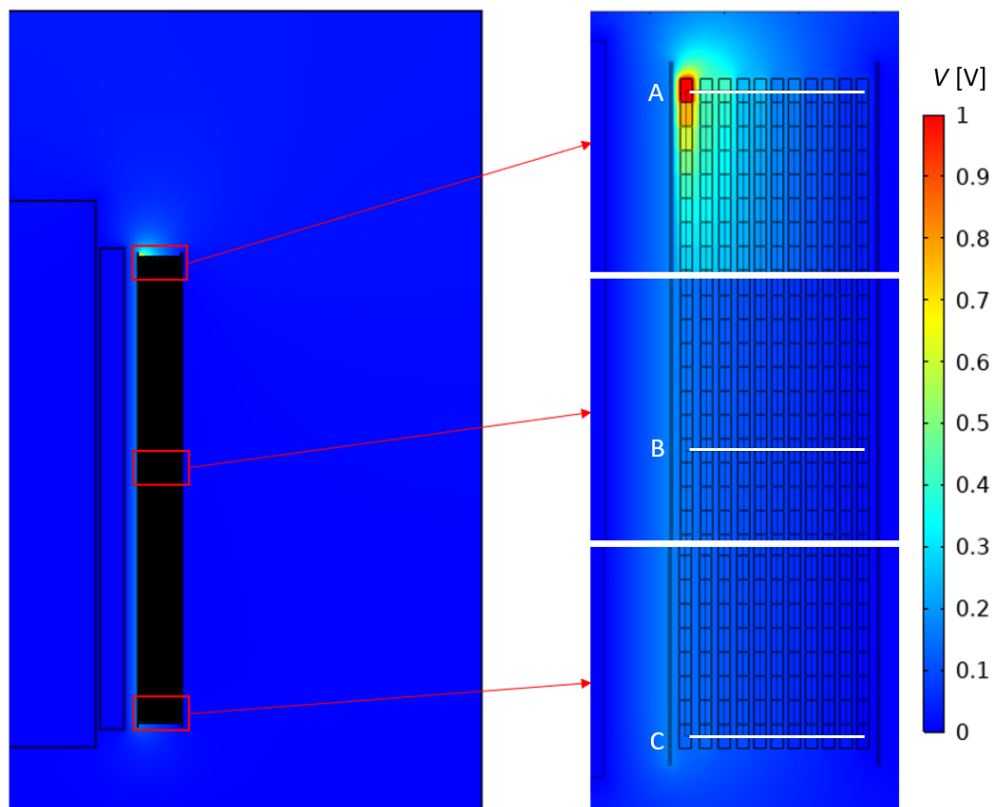
Podsumowując należy stwierdzić, że w przypadku uzwojenia wielowarstwowego, w którym ekran wewnętrzny znajduje się na wysokim potencjale, a ekran zewnętrzny jest na pływającym potencjale, największe naprężenia występują w okolicach uziemionego końca uzwojenia. Problem ten dotyczy szczególnie izolacji zwojowej w ostatniej warstwie oraz

izolacji pomiędzy dwoma ostatnimi warstwami. W takim wypadku wysoki potencjał może się pojawić w obszarach, które normalnie powinny znajdować się w obszarze niskiego potencjału (np. ostatnia warstwa). Z tego względu należy zadbać o wykonanie prawidłowego połączenia ekranu zewnętrznego z uziemionym punktem neutralnym transformatora, aby uniknąć ryzyka wystąpienia znacznych napiężeń w okolicach końca uzwojenia.

### 7.3.5 Konfiguracja 3 – ekran wewnętrzny - odłączony, ekran zewnętrzny - podłączony

Analizowana konfiguracja dotyczy uzwojenia, w którym ekran wewnętrzny znajduje się na pływającym potencjale (nie jest dołączony do początku uzwojenia), a ekran zewnętrzny jest uziemiony i połączony z ostatnim zwojem w uzwojeniu ( $V=0$  V). Pierwszy zwoj uzwojenia znajduje się na potencjale  $V_0=1$  V. W symulacji uwzględniono wpływ połączeń pomiędzy warstwami, zgodnie z zasadą zaprezentowaną w rozdziale 7.3.1. Pozostałe zwoje w uzwojeniu były traktowane jak izolowane od siebie pierścienie znajdujące się na pływających potencjałach.

Obliczony został rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.36 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w całym modelu obliczeniowym oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.

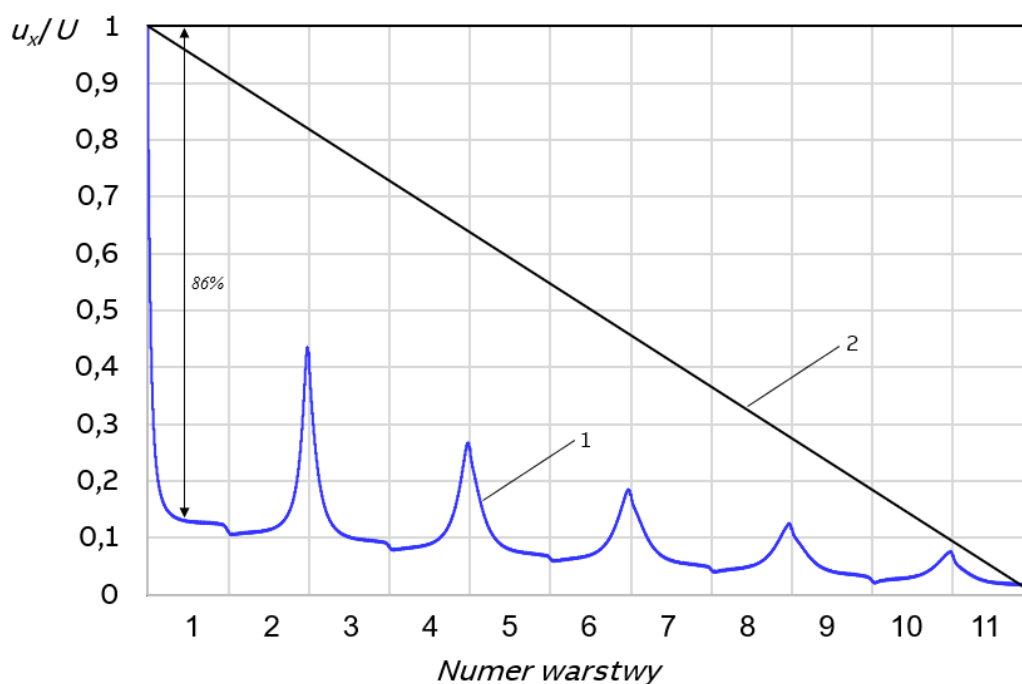


Rys. 7.36 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym z dwoma ekranami – ekran wewnętrzny - pływający potencjał, ekran zewnętrzny - uziemiony



W analizowanym przypadku, widać znaczące różnice w obrazie rozkładu potencjału elektrostatycznego w górnej oraz środkowej i dolnej części uzwojenia. Pomimo obecności ekranów, rozkład potencjału w uzwojeniu jest bardziej zbliżony do przypadku uzwojenia nieekranowanego. Górne krańce warstw znajdują się w dość silnym polu wytworzonym przez pierwszy zwoj pierwszej warstwy i przyjmują wyższe potencjały niż zwoje w pozostałej części uzwojenia. W dolnej i środkowej części uzwojenia, potencjały zwojów są natomiast bliskie potencjałowi ziemi.

Brak połączenia ekranu wewnętrznego z początkiem uzwojenia znacząco osłabił sprzężenie pojemnościowe pierwszej warstwy z ekranem. Ekran wewnętrzny przyjął potencjał na poziomie ok. 17% wartości potencjału  $V_0$  (maksymalnej), co spowodowało powstanie znacznych gradientów potencjału wzdłuż pierwszej warstwy oraz pomiędzy pierwszą i drugą warstwą w obrębie ich górnych części, a także pomiędzy warstwą pierwszą, a ekranem wewnętrznym. Gradient potencjału wzdłuż początkowych zwojów pierwszej warstwy, przedstawiony na Rys. 7.37, jest nawet bardziej stromy niż w tym samym obszarze w uzwojeniu bez ekranów (Rys. 7.24). Skutkuje to znacznie wyższymi naprężeniami międzyzwojowymi w tym obszarze, przedstawionymi na Rys. 7.38. Różnice potencjałów i wynikające z nich naprężenia elektryczne pomiędzy dwoma pierwszymi warstwami są również większe niż w przypadku uzwojenia nieekranowanego (Rys. 7.38 oraz Rys. 7.25).

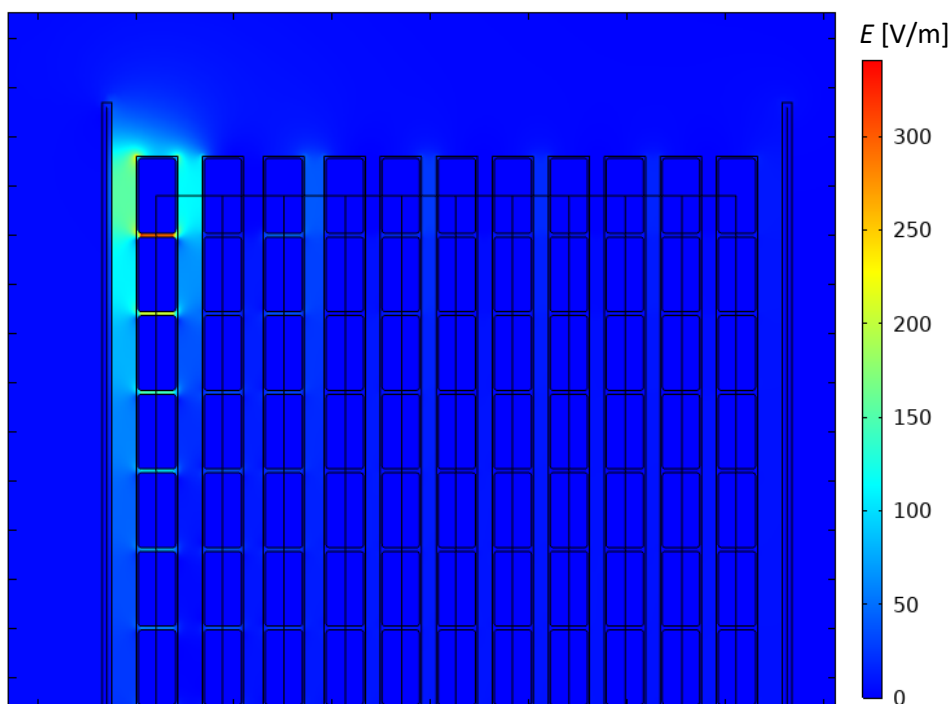


Rys. 7.37 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys 7.2) w uzwojeniu wielowarstwowym z ekranem wewnętrznym odłączonym oraz zewnętrznym uziemionym (Rys. 7.36); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy

Pojemnościowy rozkład początkowy potencjału elektrostatycznego w analizowanym uzwojeniu, przedstawiony na Rys. 7.37, jest silnie nieliniowy, co wynika z przyjęcia przez ekran wewnętrzny dość niskiego potencjału, w porównaniu do potencjału wymuszającego. Spowodowało to podobny efekt jak pojemność do uziemionego uzwojenia DN w przypadku uzwojenia bez ekranów. W tym jednak przypadku, ze względu na bliskość ekranu znajdującego

się na stosunkowo niskim potencjale względem pierwszej warstwy, jego wpływ na kształtowanie rozkładu początkowego jest bardzo mocny.

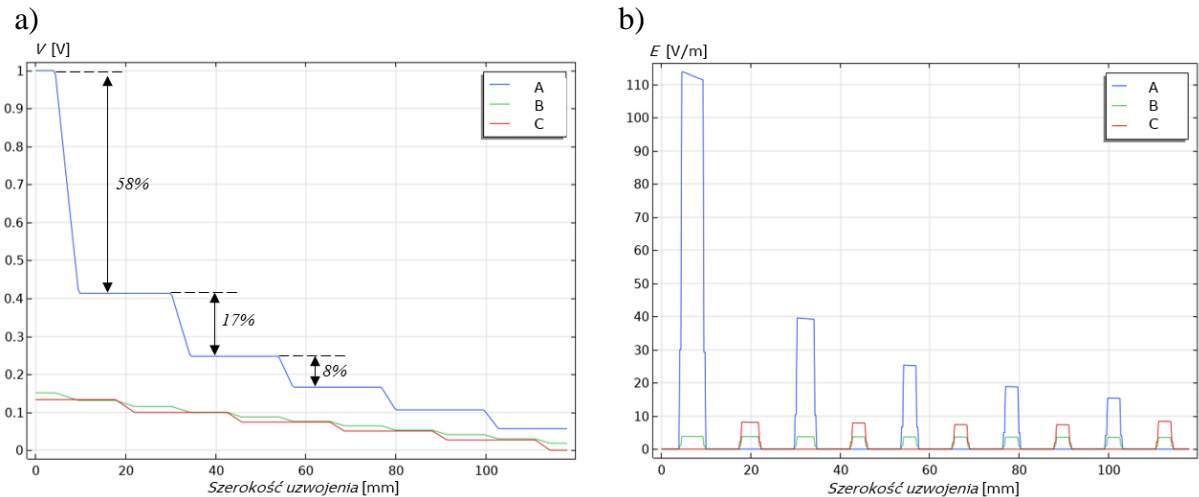
Na Rys. 7.37 widoczne są bardzo duże gradienty potencjału w obrębie górnych zwojów w początkowych warstwach uzwojenia. Największy gradient panuje wzdłuż warstwy pierwszej, a następnie stopniowo maleje, aż w okolicach końcowych warstw gradienty potencjału są niewielkie. Potwierdza to również rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia przedstawiony na Rys. 7.38. Można zauważyć, że naprężenia elektryczne maleją wraz z oddalaniem się od początku uzwojenia w kierunku warstw zewnętrznych.



Rys. 7.38 Rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia z Rys. 7.36 dla potencjału wymuszającego  $V=V_0=1$  V

Na Rys. 7.39 przedstawiono rozkłady potencjału i pola elektrostatycznego wykreślone poziomo, wzdłuż trzech linii A, B, C (Rys. 7.36) przechodzących przez wszystkie warstwy odpowiednio u góry, w środku oraz na dole uzwojenia. Rozkład potencjału wzdłuż górnych zwojów warstw (linia A) i wynikający z niego rozkład natężenia pola elektrostatycznego pomiędzy warstwami są bardzo nierównomierne. Różnica potencjału pomiędzy skrajnymi górnymi zwojami pierwszej i drugiej warstwy wynosi około 58% wartości szczytowej narzuconego potencjału  $V_0$  (Rys. 7.39a). Maksymalne naprężenia elektryczne pomiędzy pierwszą i drugą warstwą uzwojenia (Rys. 7.39b) są o ok. 40% wyższe niż w przypadku uzwojenia bez ekranów (Rys. 7.26b).

Rozkłady potencjału w połowie wysokości warstw (linia B) oraz w obrębie dolnych zwojów (linia C) są bardzo równomierne, co skutkuje równomiernie naprężaną izolacją międzywarstwową w środku i na dole uzwojenia (Rys. 7.39a i b). Potencjał dolnych zwojów pierwszej warstwy jest na poziomie 13% wartości szczytowej i stopniowo maleje do zera w miarę oddalania się od pierwszej warstwy. Potencjały zwojów znajdujących się w środkowej części uzwojenia przyjmują zbliżone wartości jak potencjały skrajnych dolnych zwojów.



Rys. 7.39 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć A, B i C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole (Rys. 7.36)

Podsumowując należy stwierdzić, że w przypadku uzwojenia wielowarstwowego, w którym ekran wewnętrzny znajduje się na pływającym potencjale, a ekran zewnętrzny jest uziemiony, największym narażeniem poddawana jest izolacja początku uzwojenia. Problem dotyczy szczególnie początkowych zwojów pierwszej warstwy oraz izolacji pomiędzy warstwą pierwszą i drugą na górze uzwojenia. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części transformatora w przypadku stosowania tego typu konstrukcji. Zważywszy na wyniki symulacji, taka konstrukcja powinna być unikana, ale w praktyce może dojść do pracy transformatora w takiej konfiguracji w przypadku awarii, lub błędu montażowego na etapie produkcji.

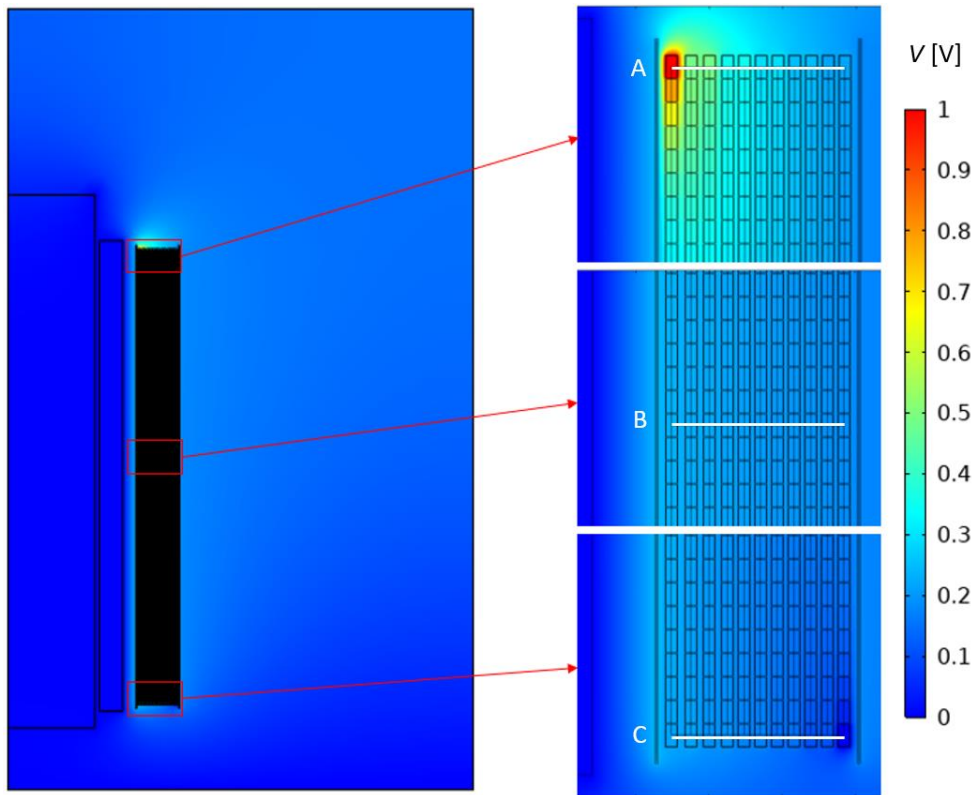
### 7.3.6 Konfiguracja 4 – oba ekrany na pływających potencjałach

W analizowanym przypadku oba ekrany elektryczne znajdowały się na pływających potencjałach i były jedynie pojemnościowo sprzężone z uzwojeniem (brak bezpośredniego połączenia). W symulacji uwzględniono wpływ połączeń międzywarstwowych zgodnie z metodą zaprezentowaną w rozdziale 7.3.1. Pierwszy zwoj uzwojenia znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast ostatni był uziemiony ( $V=0$  V). Pozostałe zwoje były traktowane jak izolowane od siebie pierścienie znajdujące się na pływających potencjałach.

Obliczony został rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.40 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.

Obecna konfiguracja posiada cechy wspólne analizowanych wcześniej konfiguracji nr 2 i nr 3, w których tylko jeden z ekranów znajdował się na pływającym potencjale. W rozpatrywanym przypadku sprzężenie obu ekranów z uzwojeniem zostało osłabione i przyjęły one potencjały przecinających je linii ekwipotencjalnych. Ekran wewnętrzny znajdował się na potencjale  $24\%V_0$ , a ekran zewnętrzny na potencjale  $18\%V_0$ . Na Rys. 7.40

widać znaczną różnicę w obrazie potencjału elektrostatycznego w górnej części uzwojenia, w porównaniu do części środkowej i dolnej. W górnej części potencjał rozkłada się nierównomiernie, a w środku i na dole uzwojenia jest dość równomierny, a zwoje przyjmują potencjały na poziomie około 20% wartości maksymalnej  $V_0$ .

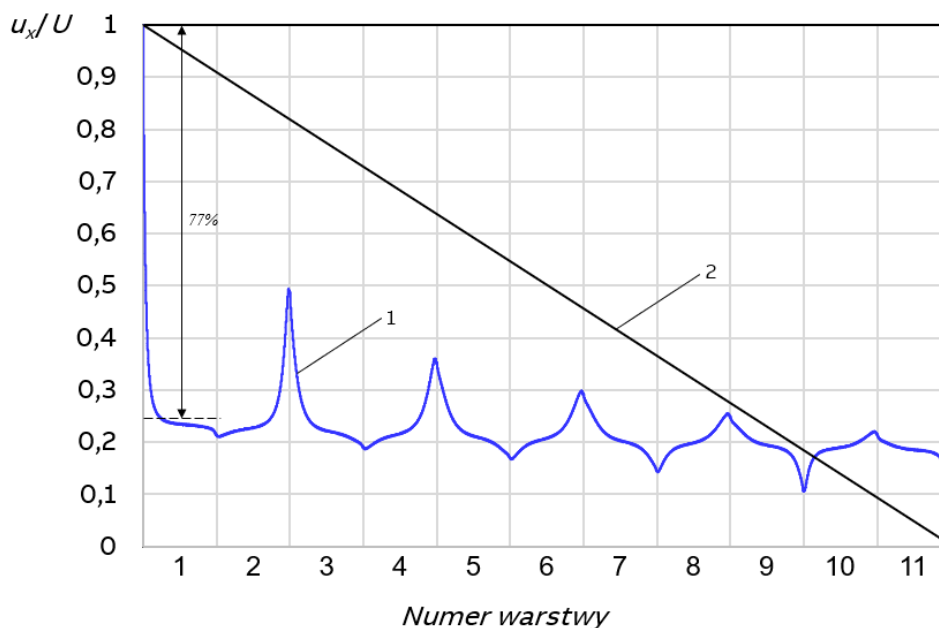


Rys. 7.40 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym z dwoma ekranami na pływającym potencjale

Na Rys. 7.41 przedstawiono pojemnościowy rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu z dwoma ekranami na pływającym potencjale. Rozkład ten znacząco odbiega od liniowego rozkładu końcowego, szczególnie w obrębie początkowych warstw uzwojenia. Zbliżając się do końca uzwojenia, oba rozkłady zbliżają się do siebie. Można zauważyć, że rozkład potencjału w obecnym przypadku posiada pewne cechy rozkładów z konfiguracji nr 2 i 3 i przyjmuje wartości pośrednie pomiędzy rozkładami w uzwojeniu z tylko jednym ekranem na pływającym potencjale. W pierwszej warstwie występują silne gradienty potencjału sięgające 77% wartości szczytowej potencjału wymuszającego  $V_0$  i występują one na obszarze tylko kilku zwojów, w pobliżu początku uzwojenia. Potencjały dolnych krańców warstw znajdują się na potencjale ok. 20% wartości maksymalnej  $V_0$ . Potencjały górnych krańców warstw rosną ze względu na oddziaływanie silnego pola od pierwszego zwoju uzwojenia, znajdującego się na potencjale  $V=V_0$ . W takim uzwojeniu można spodziewać się zwiększenia wartości maksymalnych przepięć, szczególnie w początkowym fragmencie uzwojenia.

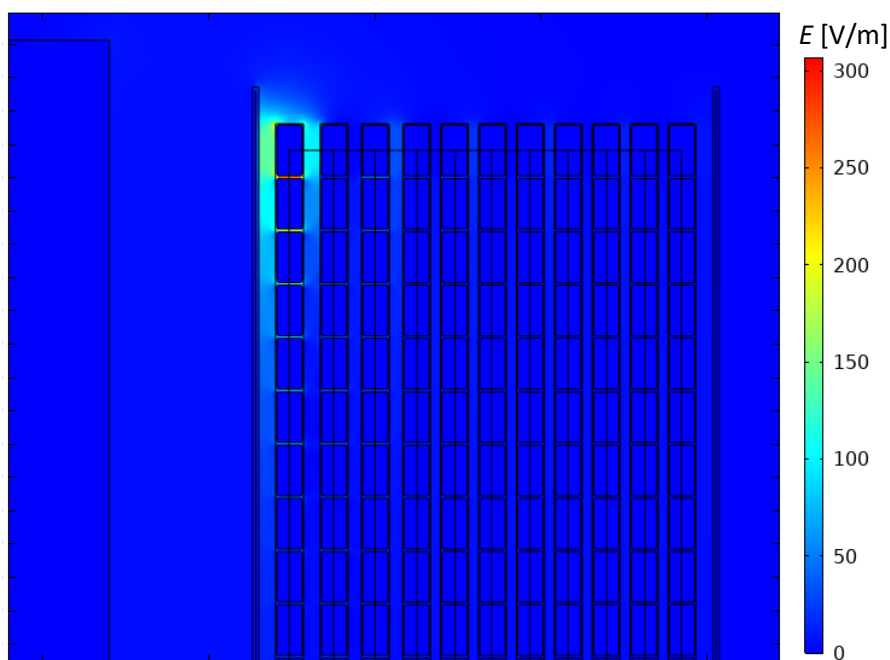
Warto również zauważyć, że rozkład potencjału wzdłuż uzwojenia (Rys. 7.41), wygląda jak kombinacja przypadku uzwojenia nieekranowanego i ekranowanego, posiada cechy obu tych przypadków jednocześnie. Na górnych krańcach warstw rozkład wygląda podobnie jak

w uzwojeniu nieekranowanym, natomiast w środkowej części każdej warstwy potencjał ustala się na niemal jednakowym poziomie i opada na dolnych krańcach warstw, podobnie jak w przypadku uzwojenia ekranowanego.



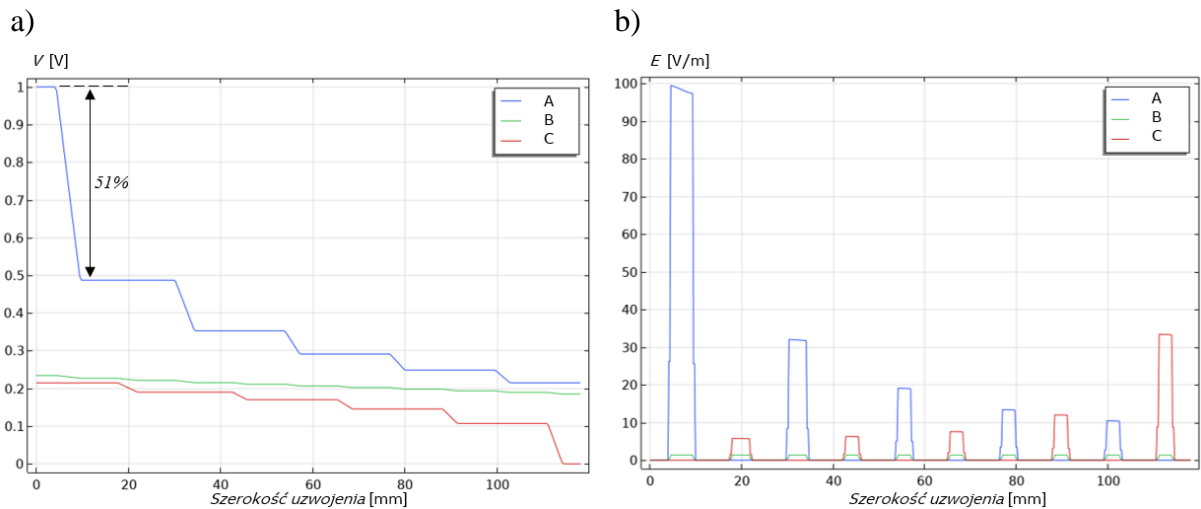
Rys. 7.41 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojenia wielowarstwowym z dwoma ekranami na pływających potencjałach (Rys. 7.40); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy

Rozkład natężenia pola elektrostatycznego przedstawiony na Rys. 7.42 potwierdza silne naprężenia izolacji międzyzwojowej w pierwszej warstwie oraz izolacji pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami, a także pomiędzy warstwą pierwszą, a ekranem wewnętrznym w górnym obszarze uzwojenia. Naprężenia elektryczne maleją wraz z oddalaniem się do początku uzwojenia.



Rys. 7.42 Rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia z dwoma ekranami na pływającym potencjale (Rys. 7.40)

Na Rys. 7.43 przedstawiono rozkład potencjału i natężenia pola elektrostatycznego wykreślony wzdłuż trzech poziomych linii A, B, C, przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku oraz na dole uzwojenia. Rozkład potencjału wzdłuż górnych zwojów warstw (linia A) i wynikający z niego rozkład natężenia pola elektrostatycznego pomiędzy warstwami, są bardzo nierównomierne. Różnica potencjału pomiędzy skrajnymi górnymi zwojami pierwszej i drugiej warstwy wynosi około 51% wartości szczytowej narzuconego potencjału  $V_0$  (Rys. 7.43a). Wynikające z tego maksymalne naprężenia elektryczne pomiędzy pierwszą i drugą warstwą uzwojenia (Rys. 7.43b) osiągają duże wartości maksymalne. W środku wysokości uzwojenia (linia B) potencjał osiąga wartość ok. 20% wartości maksymalnej  $V_0$  we wszystkich warstwach, dzięki czemu izolacja międzywarstwowa nie jest poddawana działaniu silnych naprężeń. W dolnej części uzwojenia (linia C), potencjał początkowych warstw jest na poziomie 20% wartości  $V_0$  i maleje do zera zbliżając się do ostatniej warstwy. W dolnym obszarze uzwojenia największym naprężeniom jest poddawana izolacja pomiędzy ostatnimi dwoma warstwami, ale naprężenia są dużo niższe, niż te panujące na początku uzwojenia (krotność 3).



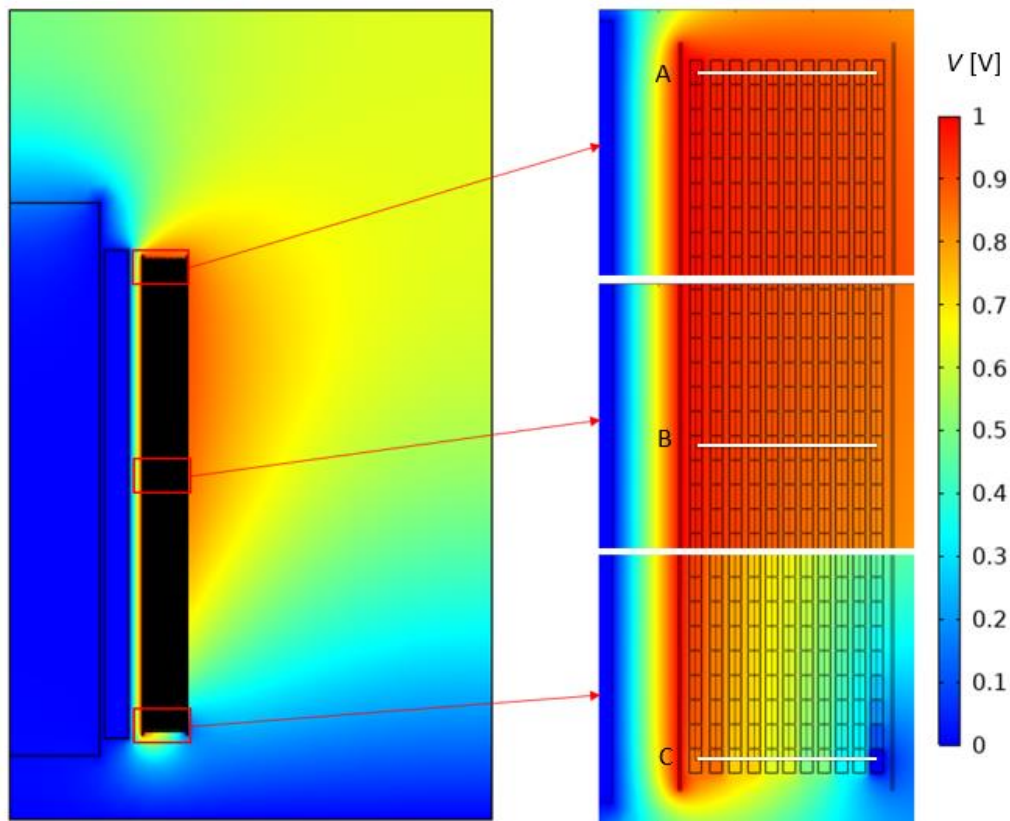
Rys. 7.43 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć A, B i C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole uzwojenia (Rys. 7.40)

Podsumowując należy stwierdzić, że w przypadku uzwojenia wielowarstwowego, w którym ekran wewnętrzny i zewnętrzny znajdują się na pływających potencjałach, największym narażeniom, w początkowej fazie oddziaływania udaru, poddawana jest izolacja początku uzwojenia. Podobnie jak w przypadku konfiguracji 0 i 3 (brak ekranu wewnętrznego oraz ekran wewnętrzny na pływającym potencjale), problem dotyczy szczególnie początkowych zwojów pierwszej warstwy oraz izolacji pomiędzy warstwą pierwszą i drugą na górze uzwojenia. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części transformatora w przypadku stosowania tego typu konstrukcji. W tym jednak wypadku nie można zaniedbać zwiększonych narażeń panujących na końcu uzwojenia.

### 7.3.7 Konfiguracja 5 – ekran wewnętrzny podłączony, ekran zewnętrzny - brak

W analizowanym przypadku, w uzwojeniu znajdował się tylko jeden ekran – wewnętrzny, który był na potencjale  $V_0=1$  V, podobnie jak pierwszy zwoj uzwojenia. W uzwojeniu nie było ekranu zewnętrznego. W symulacji uwzględniono wpływ połączeń międzywarstwowych, jak wyjaśniono w rozdziale 7.3.1. Pozostałe zwoje były traktowane jak izolowane od siebie pierścienie znajdujące się na pływających potencjałach.

Obliczony został rozkład potencjału oraz natężenia pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.44 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.

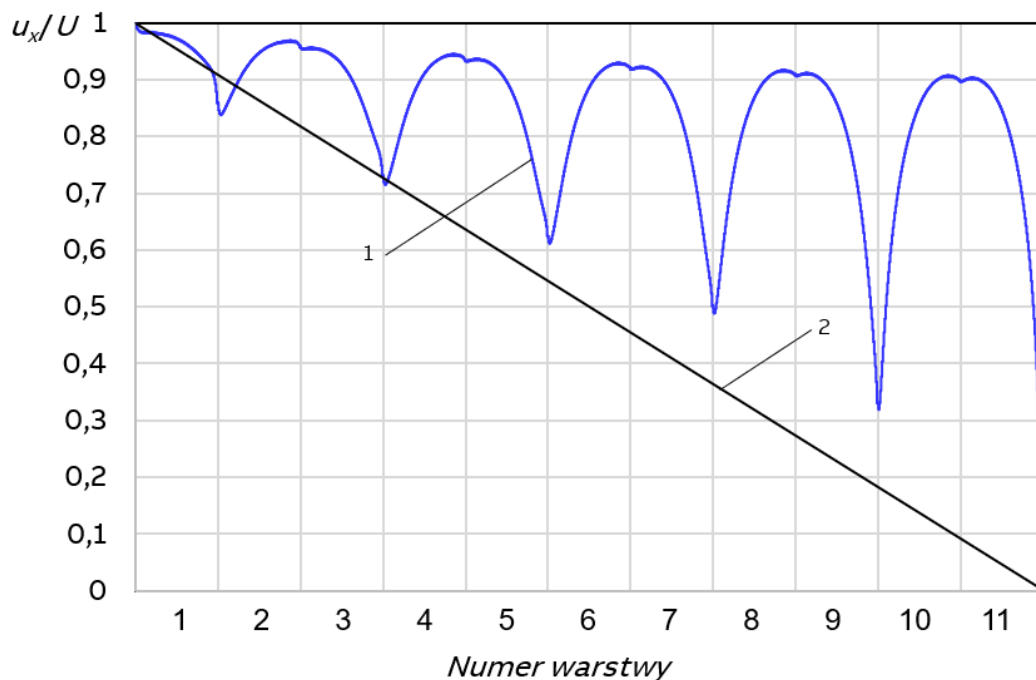


Rys. 7.44 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym z ekranem wewnętrznym na wysokim potencjale (brak ekranu zewnętrznego)

W analizowanym przypadku, można zauważyć znaczące różnice w obrazie rozkładu potencjału elektrostatycznego w różnych obszarach uzwojenia, szczególnie w jego górnej, i dolnej części. W środku uzwojenia rozkład potencjału jest dość równomierny i niewiele różni się od rozkładu panującego w jego górnej części. Potencjały zwojów znajdujących się w górnej i środkowej części uzwojenia przyjmują wartości w zakresie 85%–100%  $V_0$ . W dolnej części uzwojenia można zauważyć dużą nierównomierność i gradient potencjału, który jest w tym

obszarze podyktowany wysokim potencjałem wewnętrznego ekranu oraz uziemionym końcem uzwojenia. Sprężenie pojemnościowe do uziemionego uzwojenia DN jest wyeliminowane przez obecność ekranu od strony wewnętrznej i połączenie go z początkiem warstwy pierwszej. Brak zewnętrznego ekranu spowodował, że uzwojenie nie jest sprężone pojemnościowo z żadnym elementem od strony zewnętrznej.

Na Rys. 7.45 przedstawiono pojemnościowy rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu z ekranem wewnętrznym na wysokim potencjale, bez ekranu zewnętrznego. Rozkład ten jest silnie nieliniowy i podobnie jak w przypadku konfiguracji nr 2 (ekran wewnętrzny – wysoki potencjał, ekran zewnętrzny – pływający potencjał), w przeważającym stopniu znajduje się on powyżej linii rozkładu końcowego. W obrębie pierwszej warstwy rozkład początkowy jest zbliżony do rozkładu końcowego, ale wraz z oddalaniem się od pierwszej warstwy, odbiega od niego coraz bardziej, prowadząc do znacznych gradientów potencjału, szczególnie wzdłuż ostatniej warstwy uzwojenia. W ostatniej warstwie potencjał spada z  $90\%V_0$  do zera, powodując silne naprężenia międzyzwojowe na skrajnych dolnych zwojach. Dolne skraje końcowych warstw uzwojenia znajdują się na potencjałach o około 15-20% wyższych od wartości wynikających z liniowego rozkładu końcowego.

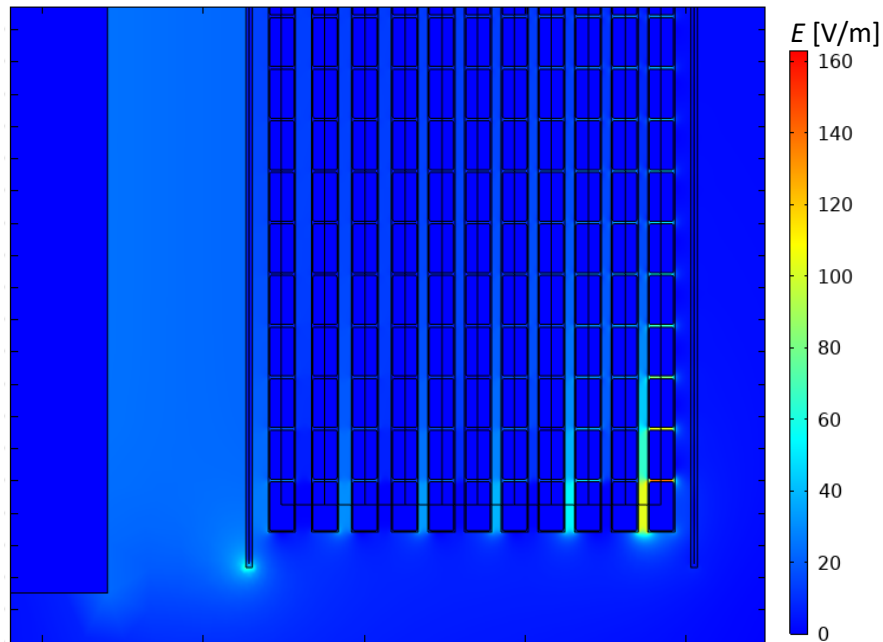


Rys. 7.45 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu wielowarstwowym z ekranem wewnętrznym na wysokim potencjale; brak ekranu zewnętrznego (Rys. 7.44); 1 – rozkład początkowy i 2 – końcowy

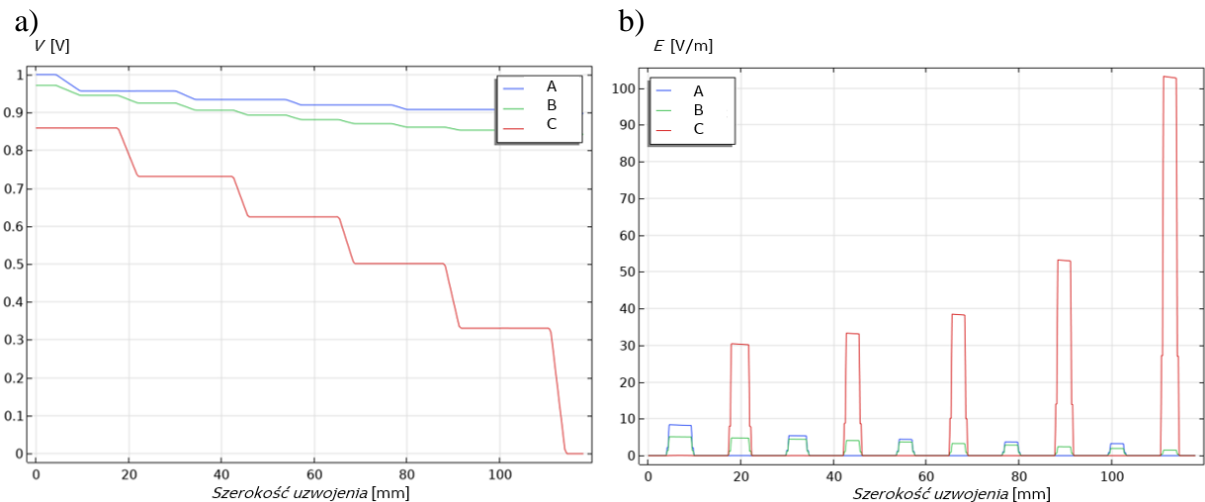
Na Rys. 7.46 przedstawiono obraz natężenia pola elektrycznego w dolnej części uzwojenia, a na Rys. 7.47 rozkłady potencjału i natężenia pola elektrostatycznego wykreślone wzdłuż trzech linii A, B, C, przechodzących poziomo przez wszystkie warstwy u góry, w środku oraz na dole uzwojenia. Można zauważyć, że izolacja międzywarstwowa pomiędzy dwoma ostatnimi warstwami (u dołu) jest silnie naprężana, a idąc w kierunku do wewnątrz, naprężenia międzywarstwowe maleją (Rys. 7.46 i Rys. 7.47b – linia C). W górnej (linia A) i środkowej (linia B) części uzwojenia naprężenia międzywarstwowe są niewielkie i dość równomierne,



ponieważ zwoje przyjmują zbliżone potencjały, na poziomie pomiędzy 85%-100% wartości szczytowej  $V_0$  (Rys. 7.47).



Rys. 7.46 Rozkład natężenia pola elektrycznego w dolnej części uzwojenia z ekranem wewnętrznym na wysokim potencjale (brak ekranu zewnętrznego)



Rys. 7.47 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć A, B i C poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole uzwojenia (Rys. 7.44)

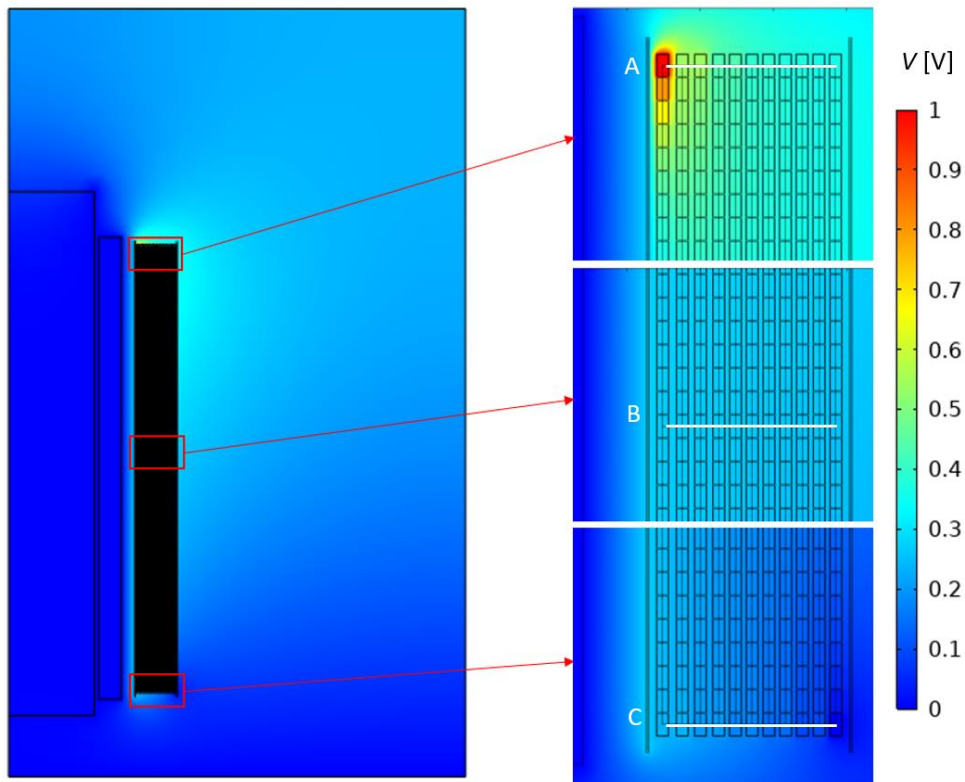
Podsumowując należy stwierdzić, że w przypadku uzwojenia wielowarstwowego, w którym zainstalowany jest tylko jeden ekran (wewnętrzny) i znajduje się on na wysokim potencjale, największe naprężenia występują w okolicach końca uzwojenia. Problem ten dotyczy szczególnie izolacji zwojowej w ostatniej warstwie oraz izolacji pomiędzy dwoma ostatnimi warstwami. W takim wypadku wysoki potencjał może się pojawić w obszarach, które normalnie powinny znajdować się w obszarze niskiego potencjału. Warto zauważyć, że zarówno rozkłady początkowe potencjału, naprężenia międzywarstwowe i międzyzwojowe mają podobny charakter i zbliżony kształt, jak w przypadku konfiguracji nr 2 (wewnętrzny

ekran na wysokim potencjale, zewnętrzny ekran na pływającym potencjale). Na podstawie tego, można wnioskować, że zamontowanie w uzwojeniu ekranu zewnętrznego, ale bez jego fizycznego podpięcia do uziemionego końca, nie wpływa znacząco na zmianę narażeń przepięciowych izolacji takiego uzwojenia. W takiej sytuacji mogą pojawić się nawet większe narażenia elektryczne końca uzwojenia (szczególnie izolacji zwojowej), niż w przypadku całkowitego braku zewnętrznego ekranu.

### 7.3.8 Konfiguracja 6 – ekran wewnętrzny - odłączony, ekran zewnętrzny - brak

W analizowanym przypadku, w uzwojeniu znajdował się tylko jeden ekran (wewnętrzny) i był na pływającym potencjale. Zatem ekran był jedynie pojemnościowo sprzężony z pierwszą warstwą uzwojenia (brak bezpośredniego połączenia potencjałowego). Pierwszy zwój w uzwojeniu znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, podczas gdy ostatni zwój był uziemiony ( $V=0$  V). W symulacji uwzględniono wpływ połączeń międzywarstwowych, jak opisano w rozdziale 7.3.1. Pozostałe zwoje były traktowane jak izolowane od siebie pierścienie znajdujące się na pływających potencjałach.

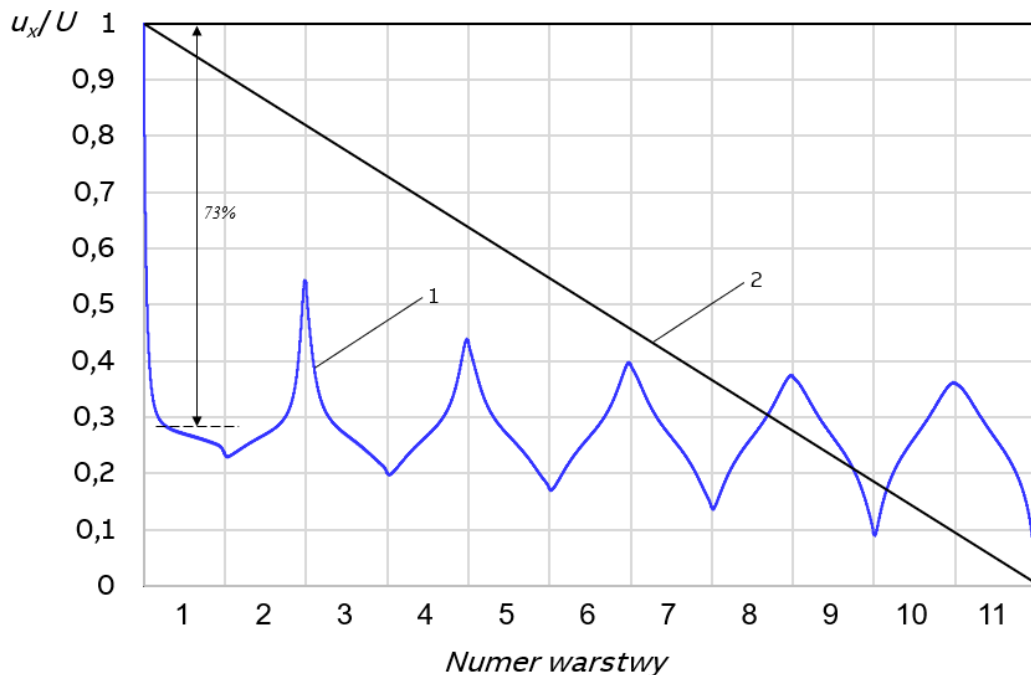
Obliczony został rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkład potencjału wzdłuż rzeczywistego kierunku nawinięcia zwojów oraz wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku wysokości i u dołu uzwojenia. Na Rys. 7.48 przedstawiono obraz rozkładu potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia.



Rys. 7.48 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale (brak ekranu zewnętrznego)

Obecna konfiguracja posiada pewne charakterystyczne cechy wspólne z konfiguracjami nr 3 i 4, w których ekran wewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale. W analizowanym przypadku, ekran wewnętrzny przyjął potencjał przecinającej go linii ekwipotencjalnej na poziomie  $27\% V_0$ . Obraz potencjału na górze uzwojenia jest nierównomierny i różni się od tego panującego w dolnej i środkowej części uzwojenia. Można zauważyć duży gradient potencjału wzdłuż początkowej części pierwszej warstwy. W środku i na dole uzwojenia rozkład potencjału jest bardziej równomierny – zwoje znajdują się na potencjale w zakresie 0 do  $25\%$  wartości potencjału  $V_0$ .

Na Rys. 7.49 przedstawiono pojemnościowy rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności nawinięcia zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale, bez ekranu zewnętrznego. Rozkład ten znacząco odbiega od liniowego rozkładu końcowego, szczególnie w obrębie początkowych warstw uzwojenia. Zbliżając się do końca uzwojenia, oba rozkłady zbliżają się do siebie. Na przedstawionym rozkładzie początkowym, można zauważyć pewne charakterystyczne cechy zarówno rozkładu potencjału występującego w uzwojeniu z ekranami, jak i nieekranowanego.



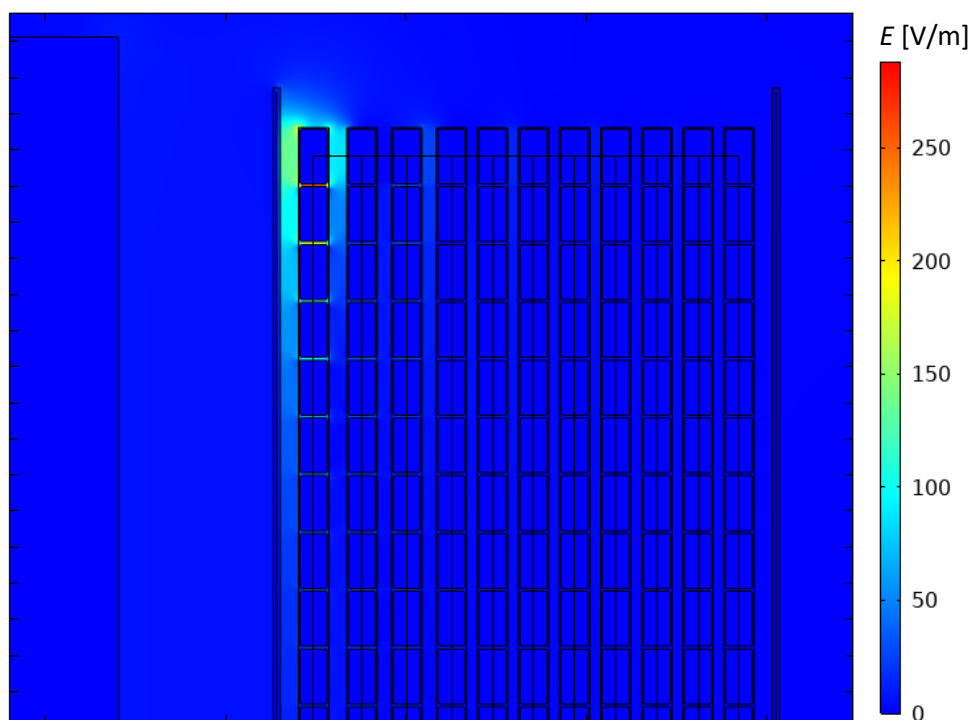
Rys. 7.49 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż rzeczywistej kolejności zwojów (zielona linia na Rys. 7.2) w uzwojeniu wielowarstwowym z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale, brak ekranu zewnętrznego (Rys. 7.48); 1 – rozkład początkowy i 2 – końcowy

W pierwszej warstwie uzwojenia potencjał drastycznie spada ze 100% do około 30% wartości maksymalnej na przestrzeni kilku zwojów, a następnie nachylenie krzywej rozkładu maleje i potencjał ustala się na dość równomiernym poziomie wzdłuż warstwy i opada dopiero na jej końcu do wartości  $23\% V_0$ . W drugiej warstwie można zaobserwować analogiczny (choć osłabiony) wpływ ekranu. Ten stromy gradient potencjału na skrajach warstw (na kilku początkowych i końcowych zwojach), a następnie złagodzenie stromości i ustalenie się dość równomiernego potencjału wzdłuż warstwy jest charakterystyczne dla uzwojenia z ekranami, które determinują kształt rozkładu potencjału w pobliskich warstwach uzwojenia. Kierując się w stronę zewnętrznych warstw, można zauważyć charakterystyczne cechy rozkładu potencjału

w uzwojeniu nieekranowanym. Brak ekranu zewnętrznego sprawia, że potencjał wzdłuż warstw znajdujących się w pobliżu końca uzwojenia nie ustala się na równomiernym poziomie, ale rośnie lub maleje, od wartości minimalnej do maksymalnej, cały czas z dużym gradientem wzdłuż warstwy. Przedstawiony na Rys. 7.49 rozkład można uznać za złożenie rozkładów początkowych z konfiguracji nr 0 (brak ekranów) oraz 4 (dwa ekrany na pływającym potencjale), przy czym rozkład z konfiguracji nr 4 panuje w pierwszej i drugiej warstwie, a następnie płynnie przechodzi w rozkład charakterystyczny dla konfiguracji nr 0 (bez ekranów) panujący na ostatnich warstwach uzwojenia.

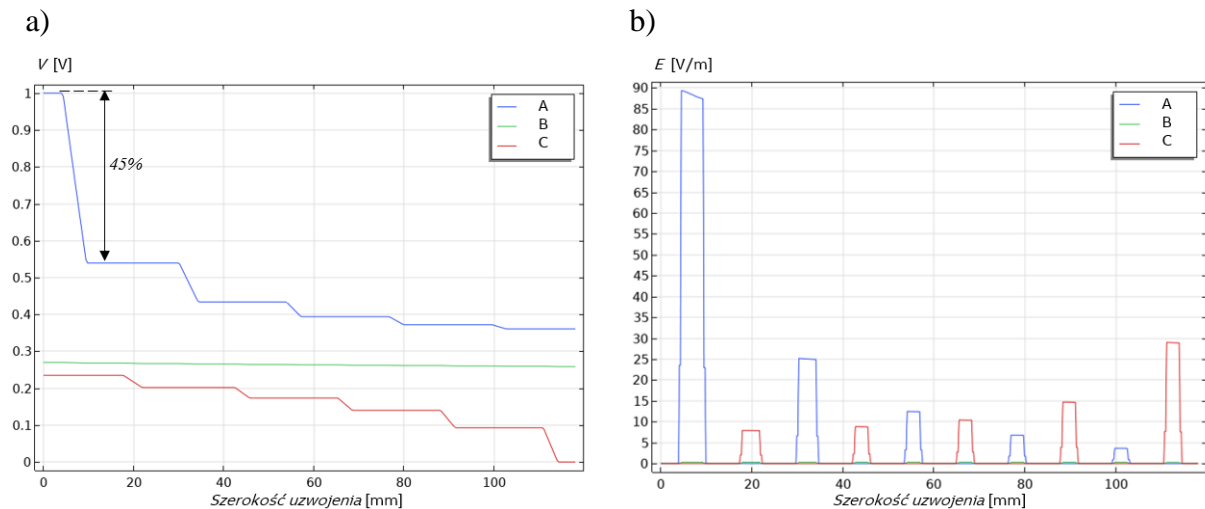
W pierwszej warstwie uzwojenia, na obszarze tylko kilku początkowych zwojów, występują silne gradienty potencjału sięgające 73% wartości szczytowej potencjału  $V_0$  (Rys. 7.49). Potencjały dolnych krańców warstw znajdują się na potencjale pomiędzy 0 do 25% wartości maksymalnej. Potencjały skrajnych górnych zwojów poszczególnych warstw rosną ze względu na oddziaływanie silnego pola od pierwszego zwoju uzwojenia, znajdującego się na wysokim potencjale. W takim uzwojeniu można spodziewać się wzrostu przepięć zarówno na początku, jak i na końcu uzwojenia, co jest w zgodzie z otrzymanymi eksperymentalnie rozkładami przepięć maksymalnych w uzwojeniu (Rys. 7.16).

Rozkład natężenia pola elektrostatycznego w górnej części analizowanego uzwojenia, przedstawiony na Rys. 7.50, potwierdza silne naprężenia izolacji międzyzwojowej w pierwszej warstwie oraz na izolacji pomiędzy pierwszymi dwoma warstwami, w górnym obszarze uzwojenia wynikające z dużego gradientu potencjału. Naprężenia elektryczne maleją wraz z oddalaniem się od początku uzwojenia. Należy również zwrócić uwagę na duże naprężenia panujące pomiędzy pierwszą warstwą, a ekranem (w górnym obszarze uzwojenia).



Rys. 7.50 Rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale, brak ekranu zewnętrznego (Rys. 7.48)

Na Rys. 7.51 przedstawiono rozkłady potencjału i natężenia pola elektrostatycznego wykreślone wzdłuż trzech poziomych linii *A, B* i *C*, przechodzących przez wszystkie warstwy u góry, w środku oraz na dole uzwojenia (Rys. 7.48). Rozkład potencjału wzdłuż górnych zwojów warstw (linia *A*) i wynikający z niego rozkład pola elektrostatycznego pomiędzy warstwami są bardzo nierównomierne. Różnica potencjału pomiędzy skrajnymi górnymi zwojami pierwszej i drugiej warstwy wynosi około 45% wartości szczytowej narzuconego potencjału  $V_0$  (Rys. 7.51a). Wynikające z tego maksymalne naprężenia elektryczne pomiędzy pierwszą i drugą warstwą uzwojenia (Rys. 7.51b) osiągają stosunkowo duże wartości maksymalne. W środku uzwojenia (linia *B*) potencjał osiąga równomierną wartość ok. 27% wartości maksymalnej we wszystkich warstwach, dzięki czemu izolacja międzywarstwowa nie jest poddawana działaniu silnych naprężeń. W dolnej części uzwojenia (linia *C*), potencjał początkowych warstw jest na poziomie 24%  $V_0$  i maleje do zera zbliżając się do ostatniej warstwy. W dolnym obszarze uzwojenia największym naprężeniem jest poddawana izolacja pomiędzy ostatnimi dwoma warstwami, ale naprężenia są dużo niższe, niż te panujące na początku uzwojenia (krotność 3).



Rys. 7.51 Rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przecięć *A, B* i *C* poprowadzonych przez warstwy uzwojenia na górze, w środku i na dole uzwojenia (Rys. 7.48)

Podsumowując należy stwierdzić, że w przypadku uzwojenia wielowarstwowego, w którym jedyny ekran (wewnętrzny) znajduje się na pływającym potencjale, największym narażeniom, w początkowej fazie oddziaływania udaru, poddawana jest izolacja początku uzwojenia. Podobnie jak w przypadku konfiguracji nr 0 i 3, problem dotyczy szczególnie początkowych zwojów pierwszej warstwy oraz izolacji pomiędzy warstwą pierwszą i drugą, a także pomiędzy pierwszą warstwą i ekranem na górze uzwojenia. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części transformatora w przypadku stosowania tego typu konstrukcji. W tym jednak wypadku nie można zaniedbać zwiększonych narażeń panujących na końcu uzwojenia.

## 7.4 Dyskusja wyników

W ramach realizacji pracy doktorskiej przeprowadzona została analiza eksperymentalna oraz symulacyjna mająca na celu zbadanie wpływu ekranów elektrostatycznych w uzwojeniu wielowarstwowym na rozkład narażeń przepięciowych w czasie oddziaływania przebiegów udarowych. Obiektem analizy był unikalny, pełnowymiarowy model pary uzwojeń jednej fazy transformatora o mocy 63 MVA, umożliwiający przeprowadzanie pewnych modyfikacji konstrukcyjnych.

Analiza obejmowała przeprowadzenie pomiarów napięć doziemnych, międzywarstwowych oraz międzyzwojowych w uzwojeniu wielowarstwowym wysokiego napięcia dla różnych konfiguracji połączenia uzwojenia z ekranami otaczającymi uzwojenie od wewnątrz i od zewnątrz. W zależności od analizowanej konfiguracji, ekrany były dołączane lub odłączane od odpowiednich zacisków, albo fizycznie demontowane z modelu uzwojenia. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów przepięciowych w uzwojeniu, przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym  $1,2/50 \mu\text{s}$ , wyznaczono rozkłady napięć maksymalnych w uzwojeniu, w zależności od konfiguracji ekranów. Dla przypadku referencyjnego (dwa ekrany podłączone do odpowiednich końców uzwojenia) wyznaczono również rozkład pseudo-początkowy napięcia (w chwili przechodzenia napięcia przez wartość maksymalną udaru piorunowego). Badania przeprowadzono metodą *RSO*, z wykorzystaniem generatora udarów powtarzalnych. Następnie, analiza została rozszerzona o część symulacyjną, mającą na celu wyznaczenie rozkładów początkowych potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu dla analogicznych konfiguracji uzwojenia i ekranów, jak w przypadku analizy eksperymentalnej. Dodatkowo wyznaczono oraz przeprowadzono analizę rozkładów początkowych potencjału w uzwojeniu nieekranowanym o jednakowej geometrii (taki przypadek nie był uwzględniony w analizie eksperymentalnej). Należy zaznaczyć, że obliczane rozkłady potencjału elektrostatycznego są rozkładami teoretycznymi, jakie wystąpiłyby w uzwojeniu w przypadku udaru o nieskończonej stromości czoła. W praktyce, wszystkie udary mają skończoną stromość i jednocześnie występuje tłumienie przebiegów przepięciowych. Z tego względu, wyznaczone rozkłady należy traktować jako umowną granicę do jakiej dążyłyby chwilowe rozkłady napięcia przy ciągłym zwiększaniu stromości narastania udaru napięciowego i skracaniu czasu rejestracji. Dodatkową specyfiką uzwojenia warstwowego jest równoczesne tworzenie się rozkładu początkowego napięcia oraz wyrównywanie tego rozkładu w małoindukcyjnym obwodzie uzwojenia. Z tego względu, analiza ta powinna być traktowana głównie jako uzupełnienie eksperymentów oraz w celu zbadania charakterystycznego wpływu ekranów na kształtowanie narażeń przepięciowych w uzwojeniach. Analiza symulacyjna jest również pomocna w określeniu naprężeń elektrycznych w izolacji i lokalizacji krytycznych obszarów w uzwojeniu, z punktu widzenia wytrzymałości izolacji, na które trzeba zwrócić szczególną uwagę w procesie projektowania i budowania uzwojenia.

Przeprowadzone analizy symulacyjne i eksperymentalne pozwoliły na porównanie różnych wariantów połączenia uzwojenia z ekranami i określenie wpływu ekranów na rozkłady narażeń przepięciowych w izolacji uzwojenia. Na podstawie analizy, wyciągnięto istotne

wnioski dotyczące wpływu ekranów elektrycznych na przebiegi w uzwojeniu warstwowym oraz określono pewne charakterystyczne cechy rozkładów w uzwojeniu nieekranowanym i ekranowanym. W celu ilościowego porównania zbadanego eksperymentalnie zagrożenia napięciowego występującego w poszczególnych topologiach uzwojenia, został zaproponowany i wprowadzony współczynnik określający skuteczność ekranowania w ogólnej ( $S_{eff}$ ) i uproszczonej ( $S_{eff2}$ ) formie (rozdział 7.2.4). Współczynnik ten określa, jak bardzo obwiednia drgań maksymalnych odbiega od idealnego, liniowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia. W tej analizie uzwojenie traktowane jest całościowo, bez rozróżnienia, w której części uzwojenia zagrożenia są największe.

Należy zaznaczyć, że wszystkie badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na uzwojeniu znajdującym się w powietrzu. Zanurzenie uzwojenia w oleju izolacyjnym spowodowałoby zmianę przenikalności dielektrycznej zastosowanych materiałów izolacyjnych, zarówno papieru, jak i przestrzeni pomiędzy warstwami, a co za tym idzie wzrost zarówno pojemności szeregowej, jak i doziemnej, które mogą zmienić się w różny sposób w zależności od konkretnej budowy uzwojenia. Praktyczne badania przeprowadzone na uzwojeniach znajdujących się najpierw w powietrzu, a następnie w kąpielii olejowej wskazują, że po zanurzeniu uzwojenia w oleju, na ogół nie należy się spodziewać istotnych deformacji oscylogramów napięć, a w najgorszym przypadku, otrzymane różnice w wartościach maksymalnych napięć nie przekraczają 7%, a zazwyczaj są mniejsze (ok. 3-5%)[95,130,134]. W pewnych sytuacjach, wartości maksymalne napięć zmierzonych w uzwojeniu w powietrzu, należałoby powiększyć o ok. 3-5% dla uzyskania narażeń panujących w uzwojeniu w oleju. Można zatem uznać, że pomiary przeprowadzone na obiekcie znajdującym się w powietrzu, w zadowalającym stopniu odtwarzają charakter narażeń napięciowych, jakim mogą być poddane uzwojenia transformatorów energetycznych w eksploatacji.

Na podstawie otrzymanych eksperymentalnie danych stwierdzono, że najbardziej korzystną, pod względem zagrożeń napięciowych, jest konstrukcja uzwojenia warstwowego wyposażonego w dwa ekrany dołączone do jego początku oraz końca, natomiast najbardziej niekorzystnymi konfiguracjami pracy uzwojenia były te, w których ekran wewnętrzny znajdował się na pływającym potencjale, czyli nie był galwanicznie połączony z początkiem uzwojenia (podłączenie, odłączenie lub brak zewnętrznego ekranu nie miało w tym wypadku znaczącego wpływu na rozkład i wartości maksymalne napięć w uzwojeniu). Potwierdziło to również porównanie wartości parametru skuteczności ekranowania  $S_{eff2}$  w poszczególnych wariantach. Ekrany silnie zwiększają pojemność szeregową uzwojenia i dodatkowo eliminują wpływ pojemności do uziemionego uzwojenia dolnego napięcia. Jest to szczególnie ważne dla początkowych warstw uzwojenia. Współczynnik  $\alpha$  wyznaczony eksperymentalnie dla uzwojenia w pełni ekranowanego mieści się w zakresie 1,2-2, co jest wartością bardzo dobrą, trudną do osiągnięcia nawet w uzwojeniach cewkowych splatanych.

Odłączenie, lub nawet fizyczne usunięcie zewnętrznego ekranu (oryginalnie dołączonego do uziemionego punktu gwiazdowego transformatora) wpływa głównie na zwiększenie wartości maksymalnych napięć na końcu uzwojenia. Odłączenie ekranu (pływający potencjał) znacznie osłabia jego sprzężenie pojemnościowe z ostatnią warstwą uzwojenia i przez to powoduje wzrost napięć. Fizyczny brak ekranu sprawia, że uzwojenie nie jest sprzężone pojemnościowo z żadnym elementem zewnętrznym, ale różnice

w porównaniu do ekranu na pływającym potencjale nie są duże, ponieważ sprzężenie pojemnościowe do „pływającego” ekranu jest niewielkie.

Odłączenie ekranu wewnętrznego od początku uzwojenia, osłabia jego sprzężenie pojemnościowe do pierwszej warstwy i wpływa na zwiększenie przepięć w całym uzwojeniu. Ze względu na mniejsze wartości pojemności szeregowej na początku uzwojenia, przepięcia w tym obszarze wzrastają, a następnie propagują w głąb uzwojenia. Powoduje to spiętrzenie przepięć w środkowym oraz końcowym obszarze uzwojenia i znacząco zwiększa naprężenia elektryczne układu izolacyjnego.

Analiza eksperymentalna przeprowadzona w pracy doktorskiej wykazała, że podłączenie ekranu do początku uzwojenia jest kluczowe w celu zapewnienia jego dobrej odporności udarowej. Podłączenie drugiego ekranu do uziemionego końca jest mniej istotne z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji uzwojenia, ale jego korzystny wpływ na wartości przepięć jest widoczny. W czasie wykonywania uzwojenia, należy zwrócić szczególną uwagę na zapewnienie pewnego połączenia elektrycznego uzwojenia z ekranami. W badanym uzwojeniu w obrębie pierwszych czterech warstw uzwojenia zastosowano kanały o większych szerokościach, niż w pozostałej części. Zwiększenie tych odległości osłabiło pojemności wzdlużne na początku uzwojenia, ale dzięki zastosowaniu ekranu wewnętrznego, niekorzystny wpływ takiej operacji został znacznie ograniczony.

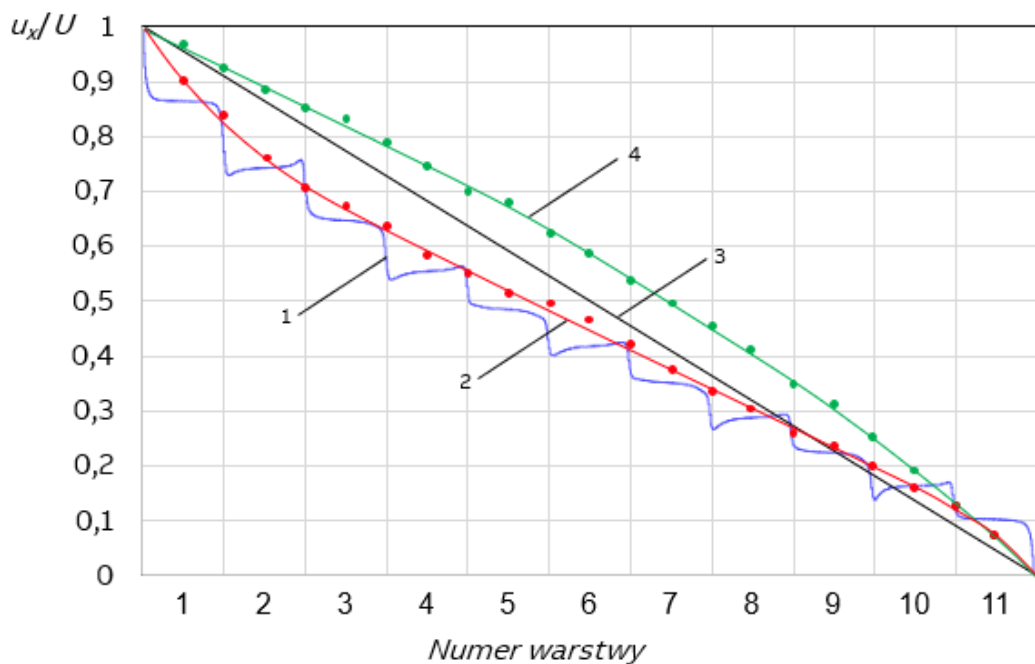
W ramach analizy eksperymentalnej wyznaczono rozkład pseudo-początkowy napięcia w uzwojeniu w pełni ekranowanym, dla chwili  $t=1,2 \mu\text{s}$ . Rozkład ten nie odzwierciedla dokładnie narażeń, jakim może być poddawane uzwojenie w początkowej chwili po doprowadzeniu fali udarowej (ze względu na wyrównywanie się rozkładu napięcia w ciągu czasu trwania czoła udaru). Z tego względu analizę eksperymentalną rozszerzono o teoretyczną analizę symulacyjną obejmującą obliczenia pojemnościowych rozkładów potencjału elektrostatycznego dla różnych topologii uzwojenia i ekranów. Symulacje, chociaż tylko teoretyczne, pozwoliły na relatywnie szybką analizę różnic w narażeniach elektrycznych dla różnych konfiguracji uzwojenia i ekranów oraz pozwoliły na zaobserwowanie charakterystycznych cech rozkładów, wynikających ze specyficznego wpływu sprzężenia pojemnościowego ekranów i uzwojenia. W tych analizach przyjęto założenie, że początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu, występujący natychmiast po pojawieniu się fali udarowej, jest czysto pojemnościowy i odpowiada rozkładowi potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu, wynikającego z warunków brzegowych, parametrów zastosowanych materiałów oraz geometrii analizowanego układu.

Analiza symulacyjna jest traktowana jako analiza uzupełniająca badania eksperymentalne, ze względu na teoretyczny charakter rozkładów czysto pojemnościowych oraz ograniczenia i uproszczenia symulacyjne. W przypadku prowadzenia jedynie badań symulacyjnych, analiza ilościowa wiąże się z większym ryzykiem niezgodności. Z tego względu analizy symulacyjne powinny być weryfikowane eksperymentalnie oraz prowadzone przez doświadczonych projektantów i konstruktorów, którzy będą w stanie wstępnie ocenić prawidłowość otrzymanych wyników i po wnikliwej analizie wyciągnąć właściwe wnioski.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że uzwojenie bez ekranów cechuje się silnie nieliniowym rozkładem początkowym, który powoduje powstanie bardzo dużych naprężeń



elektrycznych w uzwojeniu, szczególnie na izolacji zwojowej i międzywarstwowej w pobliżu początku uzwojenia. Wynika to z dużego gradientu potencjału w tym obszarze uzwojenia. Dołączenie ekranów do początku i końca uzwojenia mocno poprawia rozkład potencjału, który staje się bardzo zbliżony do liniowego rozkładu końcowego. Dodatkowo, rozkład ten można jeszcze poprawić przez zbliżenie ekranów do pierwszej i ostatniej warstwy uzwojenia, ale należy pamiętać o warunkach wytrzymałościowych. Analogicznie, odsunięcie ekranów od uzwojenia powoduje pogorszenie rozkładu początkowego i oddalenie go od liniowego rozkładu końcowego. Otrzymany symulacyjnie rozkład pojemnościowy jest w zgodzie z rozkładem pseudo-początkowym wyznaczonym eksperymentalnie dla chwili  $t=1,2 \mu s$ , co przedstawiono na Rys. 7.52. Biorąc pod uwagę teoretyczny charakter rozkładu początkowego, zastosowane uproszczenia, różnice w rzeczywistych oraz symulowanych parametrach materiałowych oraz ograniczoną liczbę punktów pomiarowych w rzeczywistym uzwojeniu można stwierdzić, że zgodność rozkładów początkowych otrzymanych eksperymentalnie i symulacyjnie jest zadowalająca. Należy jednak zauważyć, że rozkład pseudo-początkowy otrzymany eksperymentalnie najlepiej odpowiada symulowanemu rozkładowi początkowemu dla odległości obu ekranów od uzwojenia wynoszących 4 mm (Rys. 7.31). Ta różnica wynika głównie z tolerancji produkcyjnych i rozbieżności w odtworzeniu rzeczywistej geometrii i parametrów uzwojenia w modelu symulacyjnym.



Rys. 7.52 Zestawienie wyników otrzymanych eksperymentalnie i symulacyjnie dla uzwojenia referencyjnego (ekran wewnętrzny – wysoki potencjał, ekran zewnętrzny – uziemiony); 1 – początkowy rozkład potencjału elektrostatycznego (symulacja), 2 – pseudo-początkowy rozkład napięcia (pomiar), 3 – idealny rozkład końcowy, 4 – obwiednia maksymalnych wartości przepięć (pomiar)

Odłączenie zewnętrznego ekranu od uzwojenia (ekran pływający) powoduje powstanie silnie nieliniowego rozkładu potencjału elektrostatycznego w obrębie środkowych, a szczególnie końcowych warstw uzwojenia. Ma to związek z osłabieniem sprzężenia pojemnościowego ekranu i zewnętrznej warstwy uzwojenia. Brak ekranu zewnętrznego (fizyczne zdemontowanie) również prowadzi do bardzo nieliniowego rozkładu początkowego

w środku i na końcu uzwojenia. Podobne efekty zostały zaobserwowane w badaniach eksperymentalnych rozkładów maksymalnych wartości przepięć w uzwojeniu.

Odłączenie ekranu wewnętrznego (pływający potencjał) sprawia, że rozkład początkowy staje się nieliniowy (patrząc całościowo) i mocno odbiega od rozkładu końcowego w obrębie początku i środka uzwojenia. Spowodowane jest to mocnym zmniejszeniem pojemności szeregowej pierwszej warstwy uzwojenia. Taki rozkład będzie prowadził do zwiększenia przepięć w początkowej części uzwojenia, które następnie spowodują spiętrzenie przepięć w dalszej części uzwojenia, co zostało potwierdzone eksperymentalnie.

Symulacje numeryczne potwierdziły ogólne wnioski wyciągnięte na podstawie analizy eksperymentalnej. Odłączenie lub brak ekranu wewnętrznego prowadzi do powstania silnie nieliniowego rozkładu napięcia na początku uzwojenia, który skutkuje zwiększeniem przepięć na początkowej warstwie, które następnie propagują w głąb uzwojenia. Odłączenie ekranu zewnętrznego również silnie zaburza rozkład pojemnościowy napięcia w okolicach końca uzwojenia i prowadzi do wzrostu maksymalnych przepięć w tym obszarze. Można zauważyć, że teoretyczna metoda „struny drgającej” wskazywałaby na bardzo duże wartości maksymalne przepięć w uzwojeniu po utracie połączenia z ekranami, co nie zostało zaobserwowane w pomiarach. Zaobserwowano wzrost przepięć, ale nieznaczny w porównaniu do różnic w rozkładach pojemnościowych i końcowych otrzymanych w symulacjach. Potwierdza to tezę o mechanizmie zjawisk zachodzących w uzwojeniu wielowarstwowym zaproponowaną w [138] – o jednoczesnym formowaniu się rozkładu początkowego i jego wyrównywaniu w kierunku rozkładu końcowego w uzwojeniu wielowarstwowym.

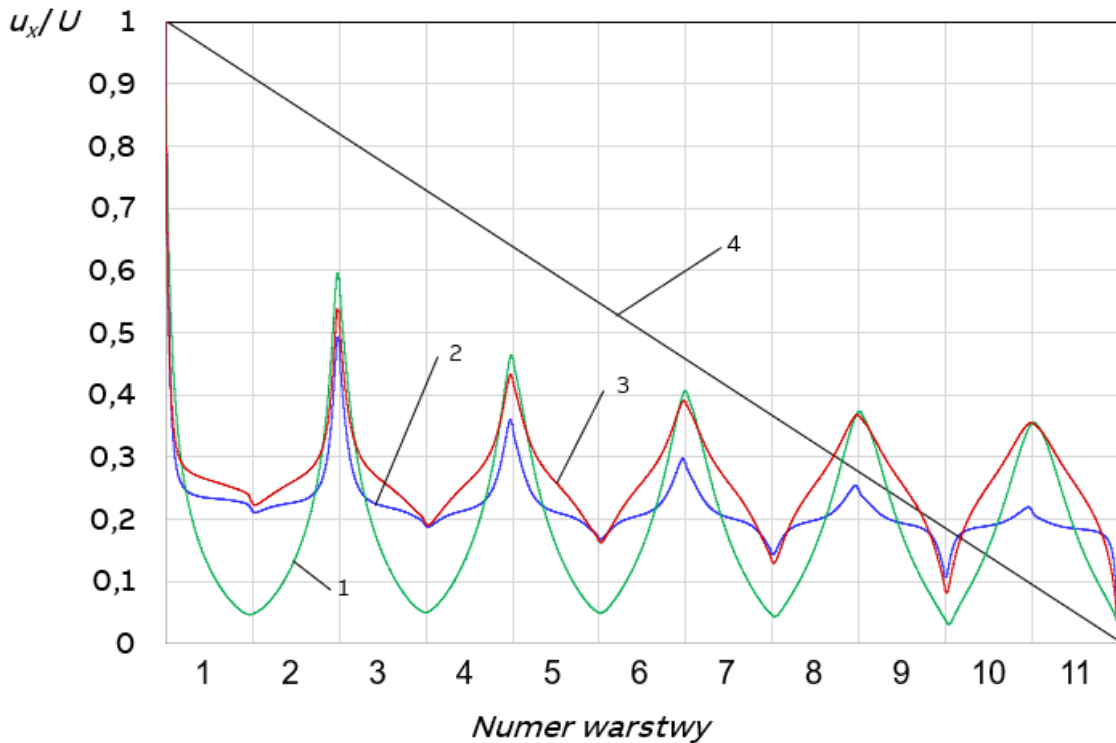
Symulacje numeryczne pozwoliły na zaobserwowanie pewnych charakterystycznych efektów działania ekranów elektrostatycznych na formowanie rozkładu pojemnościowego potencjału  $V$  w uzwojeniu. Uzwojenie nieekranowane cechuje się silnie nieliniowym rozkładem potencjału, szczególnie wzdłuż pierwszej warstwy. Skutkuje to powstaniem bardzo dużych gradientów potencjału wzdłuż warstwy i powstaniem silnych naprężeń międzyzwojowych. W kolejnych warstwach rozkład jest podobny, ale obserwowane są nieco mniejsze gradienty.

Zastosowanie ekranu dołączonego do początku uzwojenia spowodowało ekwipotencjalizację przeważającej części pierwszej warstwy, dzięki czemu potencjał w obrębie niej jest równomierny – wzrost oraz spadek potencjału jest widoczny jedynie na skrajnych zwojach, które znajdują się w obszarze, w którym ekran się kończy (efekt krawędziowy). Podobny efekt obserwuje się w przypadku dołączenia zewnętrznego ekranu. Dzięki temu naprężenia pomiędzy warstwami są bardzo równomierne (za wyjątkiem obszarów skrajnych zwojów), a duże naprężenia międzyzwojowe praktycznie nie występują (ponownie za wyjątkiem skrajnych zwojów).

Odłączenie ekranów od uzwojenia (pływający potencjał) powoduje, że potencjały zwojów w obrębie warstw silnie zależą od potencjałów jakie przyjmą wewnętrzny i zewnętrzny ekran.

Rozkłady pojemnościowe dla wariantów połączenia uzwojenia i ekranów, które łączą różne przypadki, np. ekran wewnętrzny podłączony, ekran zewnętrzny na pływającym potencjale, posiadają cechy charakterystyczne obu tych przypadków, które płynnie przechodzą

z jednego w drugi w okolicach środkowych warstw uzwojenia. Bardzo dobrze widać to na przykładzie konfiguracji nr 6, w której ekran wewnętrzny był na pływającym potencjale, przy braku ekranu zewnętrznego. W obrębie początkowych warstw można zaobserwować charakterystyczne wyrównywanie się potencjału wzdłuż warstwy (jak w konfiguracji nr 4 – dwa ekrany na pływającym potencjale), a następnie płynne przejście do silnie nieliniowych rozkładów w obrębie końcowych warstw (jak w konfiguracji nr 0 – brak ekranów). Opisaną zmianę charakteru rozkładu początkowego w zależności od topologii uzwojenia i ekranów przedstawiono na Rys. 7.53, na przykładzie rozkładów w konfiguracjach nr 0, 4 oraz 6, wspomnianych powyżej.



Rys. 7.53 Zmiana charakteru rozkładu początkowego potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu w zależności od konfiguracji połączenia uzwojenia z ekranami; 1 – rozkład początkowy w uzwojeniu nieekranowanym (konfiguracja 0), 2 – rozkład początkowy w uzwojeniu z dwoma ekranami na pływającym potencjale (konfiguracja 4), 3 – rozkład początkowy w uzwojeniu z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale, przy braku ekranu zewnętrznego (konfiguracja 6), 4 – rozkład końcowy

Badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej, pozwoliły na wyciągnięcie wniosków o istotnym znaczeniu praktycznym, dotyczących narażeń przepięciowych występujących w ekranowanych, częściowo ekranowanych oraz nieekranowanych uzwojeniach wielowarstwowych. Zaobserwowane charakterystyczne cechy różnych topologii uzwojenia i ekranów pozwalają lepiej zrozumieć ich wpływ na propagację przepięć w uzwojeniu oraz formowanie początkowego rozkładu napięcia. Niemniej jednak, nadal konieczne jest prowadzenie dalszych analiz eksperymentalnych i symulacyjnych mających na celu lepsze i dokładniejsze opisanie zjawisk zachodzących w uzwojeniu. Dalsze prace symulacyjne powinny być ukierunkowane na poprawieniu analizy ilościowej oraz lepszej korelacji z wynikami eksperymentalnymi.

## 8 Analiza przebiegów w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego

Przebiegi pojawiające się na zaciskach wejściowych transformatora są źródłem przebiegów wewnątrz uzwojeń. Ich przebiegi znacząco odbiegają od przebiegów wejściowych pod względem kształtu i wartości maksymalnych. Odpowiedź uzwojenia na pojawiające się szybkozmienne przebiegi napięciowe jest mocno uzależniona od jego konstrukcji. Układ geometryczny zwojów w uzwojeniu decyduje o parametrach  $RLC$  schematu zastępczego uzwojenia i wpływa w bezpośredni sposób na rozkład w nim napięcia udarowego. Każda zmiana konstrukcyjna: geometrii uzwojenia, sposobu prowadzenia zwojów, wymiarów, itp., ma odzwierciedlenie w wartościach i rozkładzie parametrów  $RLC$  i wpływa na zachowanie uzwojenia w czasie oddziaływania napięć udarowych [7,78,82,95,105,169]. W rozdziale 7 przedstawiono analizę przebiegów w uzwojeniu transformatora o konstrukcji warstwowej, natomiast niniejszy rozdział zawiera analizę rozkładów przebiegów w uzwojeniu o konstrukcji cewkowej.

Analizę przeprowadzono na podstawie wyników eksperymentalnych badań przebiegów w uzwojeniu cewkowym 110 kV (podczas oddziaływania udaru prostokątnego oraz znormalizowanego udaru piorunowego 1,2/50  $\mu$ s) oraz symulacji numerycznych rozkładów pola i potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu.

Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia pomiarów na rzeczywistym obiekcie, do analizy wyników badań eksperymentalnych wykorzystano źródłowe wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach realizacji pracy doktorskiej pod tytułem: „*Analiza narażeń napięciowych transformatorów energetycznych*” [169] przez Pana dr. inż. Piotra Pająka (Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie). Za udostępnienie wyników badań do analizy, autor niniejszej pracy składa serdeczne podziękowania dr. inż. Piotrowi Pająkowi. Celem przeprowadzenia analizy wyników badań eksperymentalnych wykonanych przez dr. inż. Piotra Pająka, było przede wszystkim porównanie przebiegów napięcia i rozkładów wartości szczytowych przebiegów w uzwojeniu cewkowym oraz wyznaczenie w nim pseudo-początkowych rozkładów napięcia, przy dwóch różnych przebiegach wymuszających – znormalizowanym udarze piorunowym 1,2/50  $\mu$ s oraz udarze prostokątnym. W ramach realizacji niniejszej pracy doktorskiej, analizę wyników badań eksperymentalnych rozszerzono o symulacyjną analizę rozkładów początkowych (pojemnościowych) potencjału elektrostatycznego dla różnych topologii uzwojenia cewkowego (różne sposoby nawijania zwojów) oraz o analizę wpływu zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na zmianę narażeń napięciowych. Analizowano również przypadek uzwojenia częściowo splatanego oraz uzwojenia z końcem izolowanym od ziemi.

## 8.1 Obiekt badań

Obiektem badań był układ uzwojeń jednej fazy transformatora o mocy 25 MVA i przekładni napięciowej 110 kV / 15 kV. Uzwojenie wysokiego napięcia 110 kV o konstrukcji cewkowej, było złożone z 25 dwucewek splatanych (szczegóły takich konstrukcji przedstawiono w rozdziale 4.1) o 20 zwojach w każdej. Uzwojenie było nawinięte drutem o przekroju prostokątnym. Nieznany jest sposób przeplatania zwojów zastosowany w tej konstrukcji. Uzwojenie dolnego napięcia 15 kV posiadało konstrukcję warstwową o czterech warstwach, po 40 zwojów w każdej. W badaniach nie uwzględniano rdzenia magnetycznego, ale nie miało to wpływu na otrzymywane rozkłady przepięć, ponieważ przy uziemionym uzwojeniu dolnego napięcia wpływ pojemności do uziemionego rdzenia można pominąć, a przy przebiegach szybkodziennych zazwyczaj zaniedbuje się też jego magnetyzm. Zdjęcia uzwojeń górnego i dolnego napięcia przedstawiono na Rys. 8.1 [169].

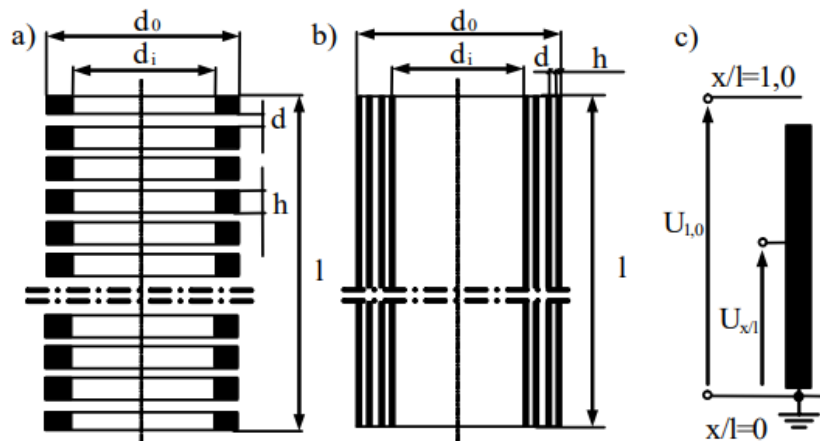


Rys. 8.1 Zdjęcia eksperymentalnych uzwojeń transformatora 25 MVA: a) uzwojenie cewkowe wysokiego napięcia 110 kV, b) uzwojenie warstwowe średniego napięcia 15 kV [169]

W tabeli 8.1 przedstawiono parametry geometryczne analizowanego układu uzwojeń, a na Rys. 8.2 uproszczony przekrój obu konstrukcji.

Tabela 8.1. Parametry mechaniczne analizowanych uzwojeń [169]

Parametr	Uzwojenie 110 kV	Uzwojenie 15 kV
Typ uzwojenia	Cewkowe	Warstwowe
Liczba zwojów w cewce/warstwie	20	40
Liczba cewek/warstw	50	4
Wysokość uzwojenia $l$	700 mm	700 mm
Średnica wewnętrzna $d_i$	765 mm	560 mm
Średnica zewnętrzna $d_o$	893 mm	700 mm
Wysokość cewki /szerokość warstwy $h$	10,3 mm	10 mm
Odległość pomiędzy cewkami/warstwami $d$	3,3 mm	6 mm



Rys. 8.2 Uproszczony przekrój uzwojenia cewkowego 110 kV (a), warstwowego 15 kV (b) oraz oznaczenie zacisków pomiarowych uzwojeń ( $x/l$  – współrzędna punktu uzwojenia w odniesieniu do wysokości,  $l$  – wysokość uzwojenia) [169]

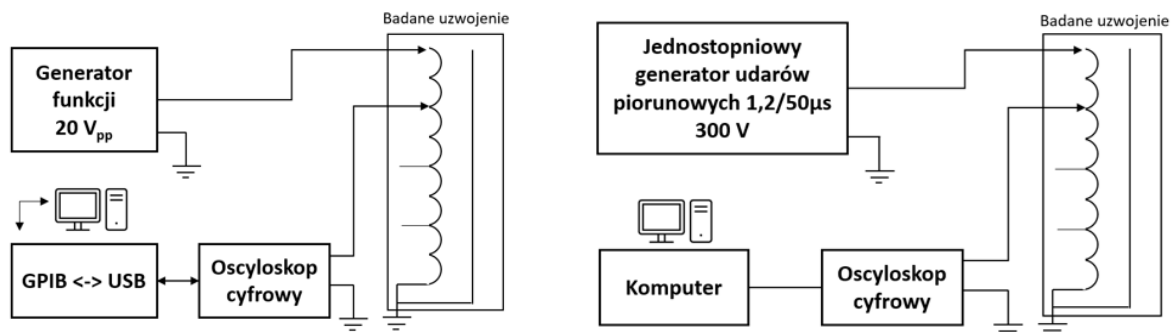
W wybranych punktach uzwojenia cewkowego (na wysokościach  $x/l=0,3; 0,5; 0,75; 1,0$ ) zamontowane były wyprowadzenia pomiarowe wykorzystywane do rejestracji przebiegów przepięć.

## 8.2 Analiza przepięć w eksperymentalnym uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego

Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia badań na rzeczywistym obiekcie, w pracy wykorzystane zostały wyniki badań przeprowadzonych przez dr. inż. Piotra Pająka, w ramach realizacji jego pracy doktorskiej [169], dzięki jego uprzejmości, za co autor niniejszej pracy serdecznie dziękuje.

Analizę rozkładu przepięć w uzwojeniu cewkowym transformatora przeprowadzono na podstawie wyników rejestracji przebiegów napięć w eksperymentalnym układzie uzwojeń jednej fazy transformatora o napięciu 110 kV / 15 kV i mocy znamionowej 25 MVA. Badania przepięć przeprowadzono metodą z oscyloskopową rejestracją czasowych przebiegów napięcia, przy wymuszeniu udarem prostokątnym oraz znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s.

Schematy blokowe układów pomiarowych wykorzystywanych do badania przepięć przy wymuszeniu udarem prostokątnym oraz znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s, przedstawiono na Rys. 8.3. Udary napięciowe o kształcie prostokątnym, były wytwarzane za pomocą niskonapięciowego generatora funkcji o napięciu 20 V<sub>pp</sub>, natomiast udary piorunowe za pomocą jednostopniowego generatora napięć udarowych, o napięciu 300 V [169].



Rys. 8.3 Schemat blokowy układu pomiarowego do rejestracji przebiegów napięć w uzwojeniu przy udarze prostokątnym (z lewej) oraz udarze napięciowym piorunowym 1,2/50 μs (z prawej)

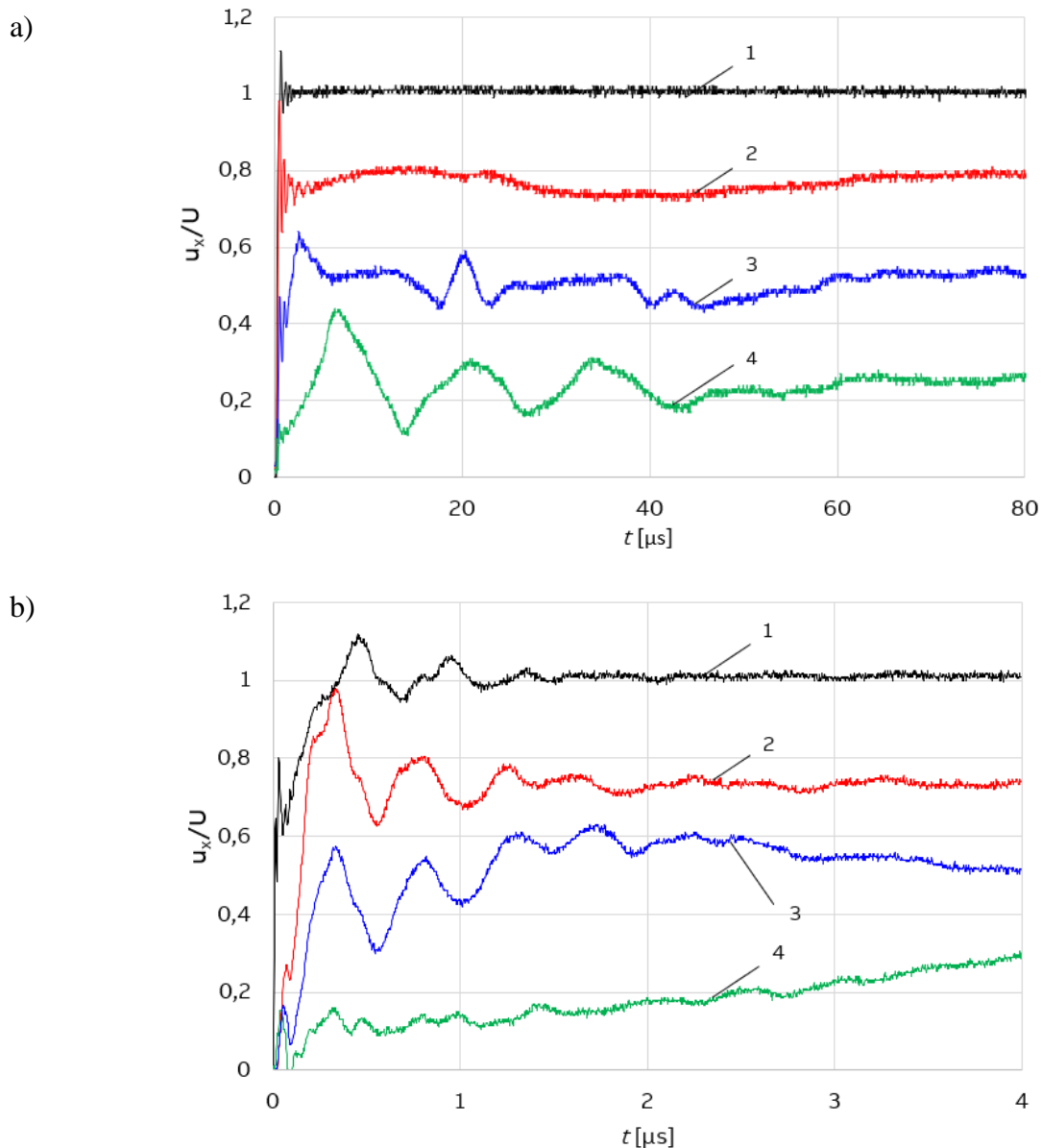
W czasie badań rejestrowano przebiegi napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia cewkowego 110 kV, zlokalizowanych w punktach  $x/l=1,0; 0,75; 0,5; 0,3$  (gdzie  $x/l$  - względna wysokość uzwojenia), czyli w cewkach numer: 1, 6, 12 i 17 (licząc od góry), na zewnętrznych zwojach. Umownie, punkt  $x/l=1,0$  to zacisk wejściowy, a  $x/l=0$  to uziemiony koniec uzwojenia.

Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy doktorskiej analizy, miały na celu ocenę narażeń przepięciowych uzwojenia cewkowego oraz porównanie pseudo-początkowego rozkładu napięcia przy dwóch różnych kształtach napięć wymuszających: prostokątnym - o stromym zboczach narastającym i udarowym piorunowym - o łagodniejszym zboczach narastającym.

### 8.2.1 Wyniki badań przebiegów napięć w uzwojeniu cewkowym przy wymuszeniu udarem prostokątnym

Przebiegi czasowe napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia cewkowego przy wymuszeniu udarem prostokątnym o czasie narastania  $t_r=5$  ns przedstawiono na Rys. 8.4 (przebiegi w dłuższym oknie czasowym oraz zbliżenia początkowych fragmentów przebiegów). Wartości napięcia są wyrażone w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia.

Analizując przedstawione na Rys. 8.4 przebiegi napięć, można zauważyć, że przebiegi napięć w głębi uzwojenia są odmienne od kształtu napięcia wymuszającego prostokątnego. W czasie pierwszych 2 μs oddziaływania udaru, widoczne są silnie tłumione oscylacje wysokoczęstotliwościowe, o częstotliwości rzędu 2 MHz. Po tym czasie, na przebiegach występują głównie drgania własne uzwojenia, o niższych częstotliwościach. Częstotliwości tych drgań różnią się w zależności od miejsca pomiarowego w uzwojeniu, co może świadczyć o niejednorodnej budowie uzwojenia i powstawaniu lokalnych obwodów rezonansowych. Oscylacje własne uzwojenia w punkcie  $x/l=0,75$  są mocno tłumione, natomiast zbliżając się do uziemionego końca uzwojenia, ich amplituda rośnie. Można zauważyć, że napięcie w poszczególnych punktach uzwojenia narasta z pewnym opóźnieniem w odniesieniu do zbocza narastającego udaru prostokątnego.



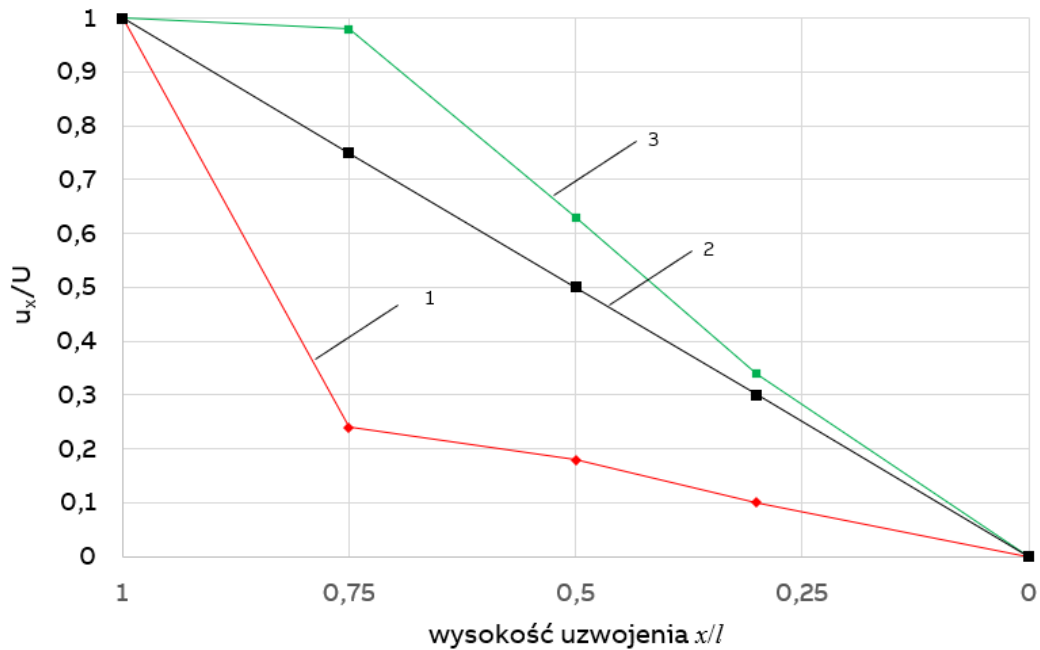
Rys. 8.4 Przebiegi czasowe przepięć doziemnych w punktach  $x/l=1,0$  (1);  $0,75$  (2);  $0,5$  (3) i  $0,3$  (4) uzwojenia cewkowego 110 kV transformatora 25 MVA przy wymuszeniu udarem prostokątnym o czasie narastania 5 ns: a) przebieg do 80  $\mu s$ , b) przebieg w pierwszych 4  $\mu s$  oddziaływania udaru

Rozkład pseudo-początkowy (wyznaczony w chwili  $t=0,04 \mu s$ ) i rozkład maksymalnych wartości napięcia wzdłuż uzwojenia przy oddziaływaniu napięcia udarowego prostokątnego, przedstawiono na Rys. 8.5, na tle idealnego liniowego rozkładu końcowego.

Rozkład pseudo-początkowy jest silnie nieliniowy i kształtem zbliżony do rozkładu pojemnościowego wyznaczonego z zależności (5.21). Rozkład ten został wyznaczony na podstawie pomiarów przebiegów napięcia jedynie w czterech punktach uzwojenia, dlatego należy oczekiwać, że rzeczywisty gradient napięcia na początkowych cewkach uzwojenia jest większy niż przedstawiono na Rys. 8.5. Taki nieliniowy rozkład napięcia prowadzi do powstania w uzwojeniu przebiegów wyrównawczych, których wartości maksymalne panujące



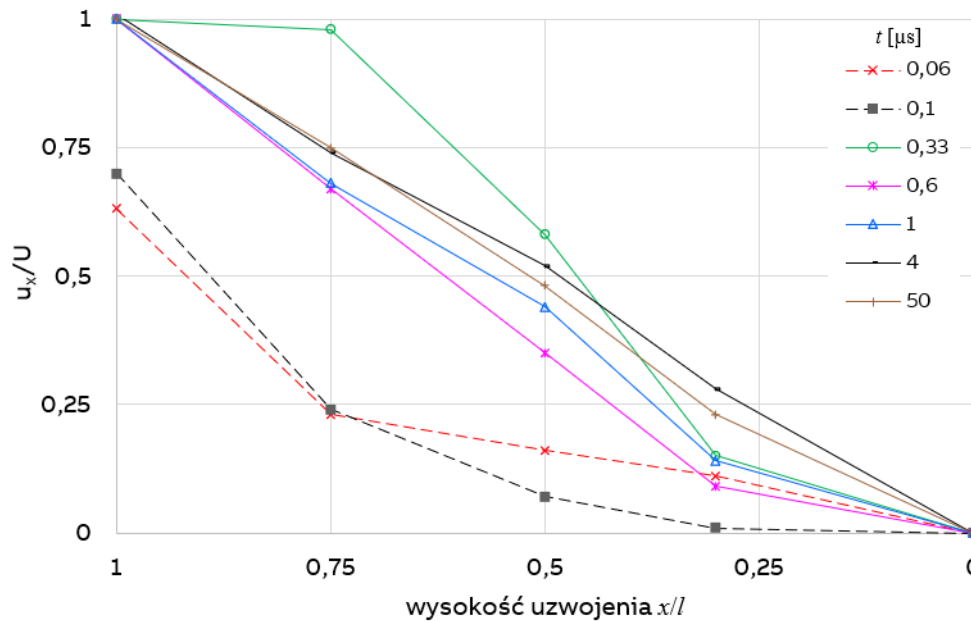
w różnych miejscach uzwojenia, przewyższają wartości napięcia wynikające z idealnego rozkładu końcowego, co obrazuje rozkład napięć maksymalnych (linia 3 na Rys. 8.5). Te zjawiska prowadzą do powstawania dużych naprężeń elektrycznych w obszarze początkowych cewek uzwojenia. Należy zwrócić uwagę, że maksymalna wartość napięcia zarejestrowana w punkcie  $x/l=0,75$  osiągała wartość  $u_x/U=0,98$ , czyli zbliżoną do wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia .



Rys. 8.5 Rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia cewkowego 110 kV przy wymuszeniu udarem prostokątnym o czasie narastania 5 ns: 1 – rozkład pseudo-początkowy, 2 – rozkład końcowy, 3 - rozkład przebiegów maksymalnych;  $x/l=1$  – początek uzwojenia,  $x/l=0$  – koniec uzwojenia

Na podstawie wyznaczonych rozkładów przebiegów maksymalnych można stwierdzić, że największym narażeniem przebiegiowym jest poddawana izolacja początkowych cewek uzwojenia (od  $x/l=1,0$  do ok.  $x/l=0,75$ ). Jest to zgodne z wyznaczonym rozkładem pseudo-początkowym, którego największa stromość występuje właśnie w tym obszarze. W dalszej części uzwojenia, rozkład przebiegów maksymalnych zbliża się do rozkładu końcowego, zbliżając się do uziemionego końca uzwojenia. Warto zaznaczyć, że w żadnym z badanych punktów, przebiegi nie przekraczają wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia.

W celu dokładniejszej analizy zjawisk zachodzących w uzwojeniu w czasie oddziaływania napięcia prostokątnego, wyznaczono chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż wysokości uzwojenia w różnych chwilach czasu  $t$  oddziaływania udaru prostokątnego (Rys. 8.6).



Rys. 8.6 Chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia cewkowego 110 kV przy wymuszeniu udarem prostokątnym o czasie narastania 5 ns - rozkłady obejmują chwile czasu  $t$  w zakresie  $0,06 \mu\text{s} - 50 \mu\text{s}$ ;  $x/l=1$  – początek uzwojenia,  $x/l=0$  – koniec uzwojenia

Analizując chwilowe rozkłady napięcia w uzwojeniu cewkowym, przy oddziaływaniu udaru prostokątnego, można zauważyć, że wartości napięć wzdłuż uzwojenia zmieniały się z wraz z czasem oddziaływania wymuszenia udarowego. W początkowej fazie oddziaływania napięcia prostokątnego (chwile czasu do  $t=0,1 \mu\text{s}$ ), rozkłady były silnie nieliniowe i zbliżone do czysto pojemnościowego rozkładu napięcia. Następnie, w uzwojeniu występowały przebiegi wyrównawcze ( $t=0,33 \mu\text{s}$ ), które prowadziły do ustalania się w uzwojeniu coraz bardziej liniowego rozkładu napięcia ( $t=0,6 \mu\text{s}$  i  $t=1 \mu\text{s}$ ). Po czasie  $t=4 \mu\text{s}$ , rozkład napięcia w uzwojeniu był praktycznie liniowy, ale był to cały czas stan nieustalony ze względu na występowanie oscylacji, wytłumiających się dopiero po ok.  $45 \mu\text{s}$ , co jest widoczne na Rys. 8.4. Z tego względu należy uznać, że rozkład liniowy panował w uzwojeniu po  $45 \mu\text{s}$  oddziaływania napięcia prostokątnego, po wytłumieniu drgań wysokoczęstotliwościowych oraz drgań własnych uzwojenia. Wartości szczytowe przebiegów wyrównawczych, występują w różnych chwilach czasu w różnych obszarach uzwojenia, ale nie przekraczają wartości maksymalnej udaru doprowadzonego do zacisków uzwojenia.

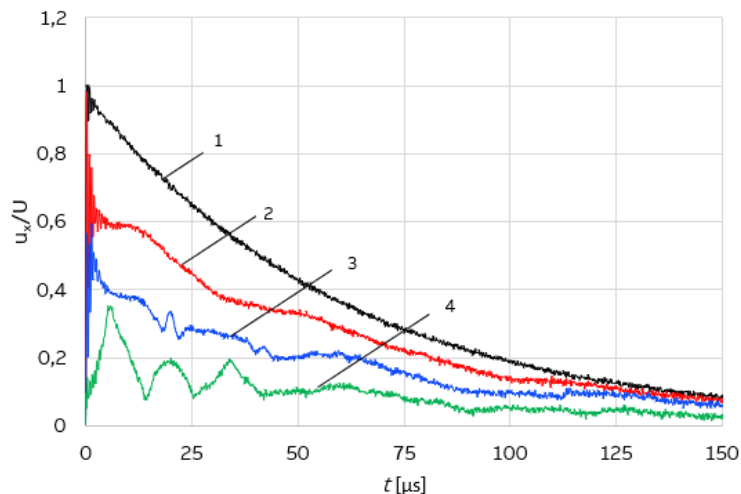
### 8.2.2 Wyniki badań przepięć w uzwojeniu cewkowym przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym

Przebiegi czasowe napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia cewkowego przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym  $1,2/50 \mu\text{s}$  przedstawiono na Rys. 8.7 (przebiegi w dłuższym oknie czasowym oraz zbliżenia początkowych fragmentów przebiegów). Wartości napięcia są wyrażone w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia.

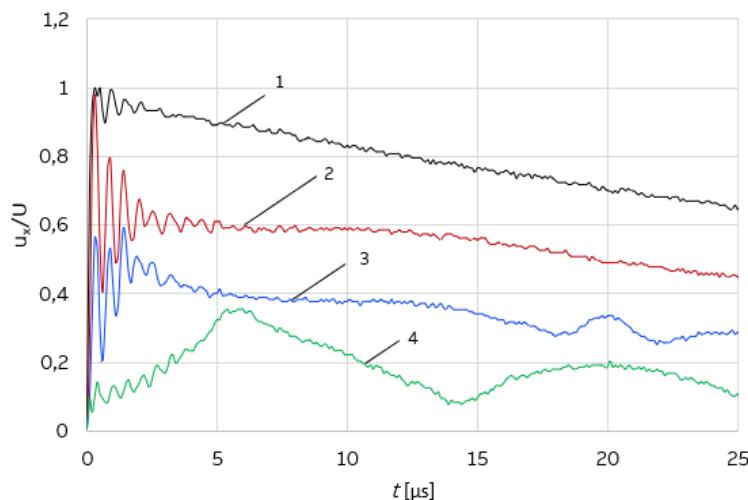
Analizując przedstawione na Rys. 8.7 przebiegi napięć doziemnych przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu\text{s}$  można wyciągnąć analogiczne wnioski, jak w przypadku analizy przebiegów zarejestrowanych przy wymuszeniu udarem prostokątnym:

- przebiegi napięć w głębi uzwojenia mają odmienny kształt niż udar wymuszający,
- w początkowej fazie oddziaływania udaru (do  $t=5 \mu\text{s}$ ) w uzwojeniu występują tłumione oscylacje wysokoczęstotliwościowe (ok. 1,8-2 MHz) nałożone na drgania podstawowej harmonicznej,
- podstawowa harmoniczna drgań napięcia w różnych punktach uzwojenia ma inną częstotliwość, co może świadczyć o lokalnych obwodach rezonansowych w uzwojeniu,
- w żadnym punkcie uzwojenia napięcia doziemne nie przekraczają wartości maksymalnej udaru doprowadzonego do zacisków uzwojenia,
- wartości maksymalne napięć występują niejednocześnie w różnych punktach,
- napięcie w punktach oddalonych od zacisku wejściowego uzwojenia narasta z pewnym opóźnieniem w odniesieniu do czoła udaru piorunowego,
- rozkład napięć wzdłuż uzwojenia w chwili przechodzenia udaru przez wartość szczytową jest nierównomierny.

a)

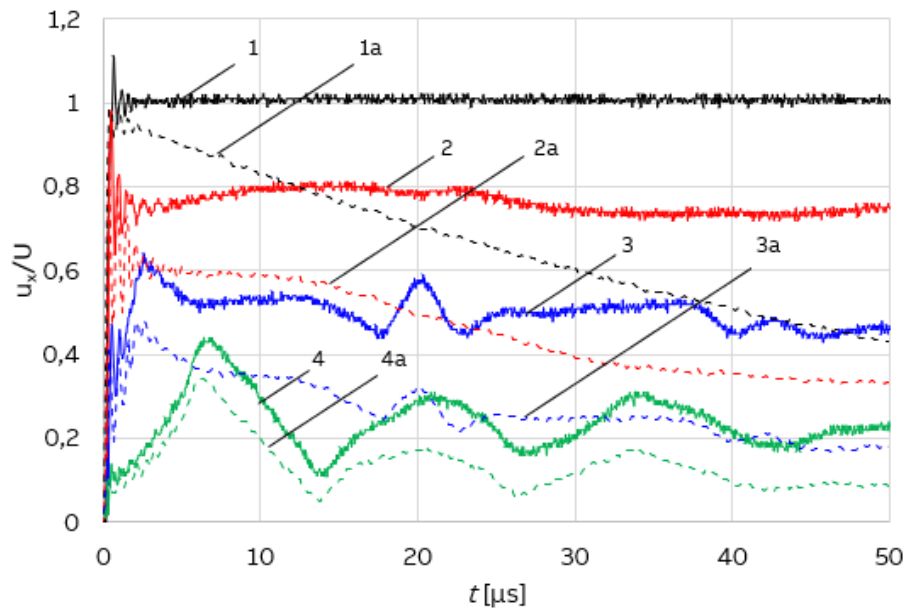


b)



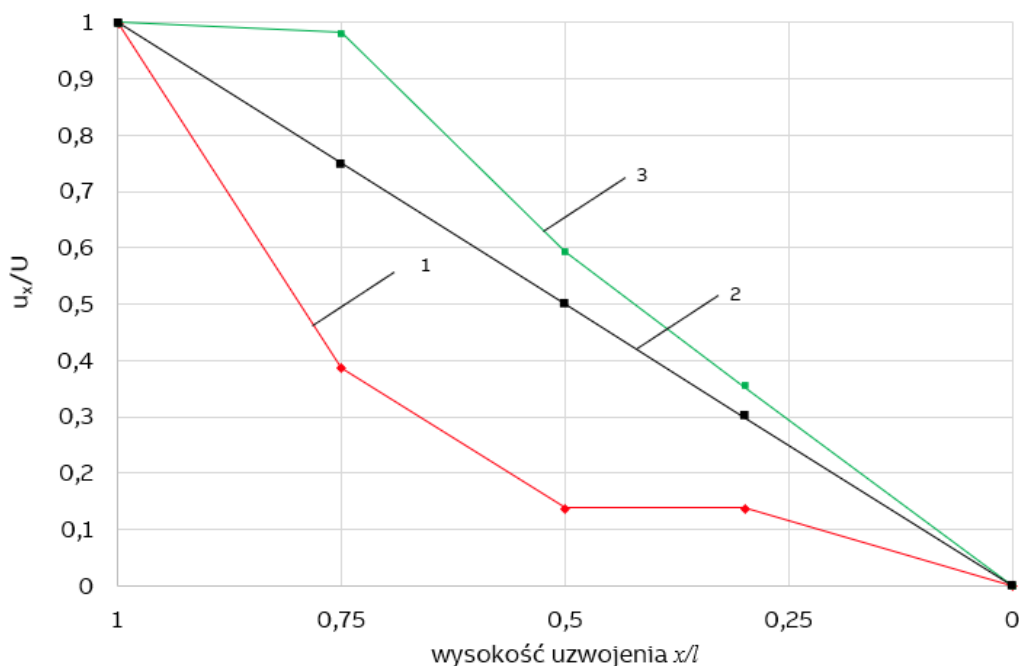
Rys. 8.7 Przebiegi czasowe napięć doziemnych w punktach  $x/l=1,0$  (1);  $0,75$  (2);  $0,5$  (3) i  $0,3$  (4) uzwojenia cewkowego 110 kV transformatora 25 MVA przy wymuszeniu znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu\text{s}$ : a) przebieg do 150  $\mu\text{s}$ , b) przebieg w pierwszych 25  $\mu\text{s}$  oddziaływania udaru

Wartości maksymalne oscylacji wysokoczęstotliwościowych (wyrażone w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości szczytowych doprowadzonych udarów) w różnych punktach uzwojenia, w czasie pierwszych 2  $\mu\text{s}$  oddziaływania udaru prostokątnego oraz udaru piorunowego są praktycznie jednakowe. W późniejszym czasie, wartości napięć w uzwojeniu przy udarze piorunowym są zauważalnie mniejsze, niż przy przebiegu prostokątnym, ze względu na opadający grzbiet udaru wymuszającego. Jest to dobrze widoczne po nałożeniu przebiegów przepięć przy obydwu wymuszeniach na jeden wykres (Rys. 8.8). Można również zauważyć, że częstotliwości drgań własnych uzwojenia przy obydwu wymuszeniach są jednakowe, a ich maksima i minima lokalne występują praktycznie w tych samych chwilach czasu.



Rys. 8.8 Zestawienie przebiegów przepięć w uzwojeniu cewkowym przy wymuszeniu:  
 - udarem prostokątnym – linia ciągła (w punktach  $x/l=1,0$  (1);  $0,75$  (2);  $0,5$  (3) i  $0,3$  (4);  
 - udarem piorunowym  $1,2/50 \mu\text{s}$  – linia przerywana ( $x/l=1,0$  (1a);  $0,75$  (2a);  $0,5$  (3a) i  $0,3$  (4a))

Rozkład pseudo-początkowy napięcia (wyznaczony w chwili  $t=0,5 \mu\text{s}$ ) i rozkład maksymalnych wartości napięcia wzdłuż uzwojenia przy oddziaływaniu napięcia udarowego piorunowego  $1,2/50 \mu\text{s}$  przedstawiono na Rys. 8.9, na tle liniowego rozkładu końcowego. Rozkładu pseudo-początkowego nie wyznaczono w chwili przechodzenia udaru przez wartość szczytową ze względu na zaburzenie go przez oscylacje wysokoczęstotliwościowe w chwili  $t=1,2 \mu\text{s}$ . Wyznaczony rozkład pseudo-początkowy (linia 1 na Rys. 8.9) ma charakter pojemnościowy i jest silnie nieliniowy, co prowadzi do wzbudzenia w uzwojeniu drgań wyrównawczych o wartościach maksymalnych znacznie przekraczających napięcia wynikające z liniowego rozkładu końcowego, co obrazuje rozkład napięć maksymalnych w uzwojeniu (linia 3 na Rys. 8.9). To z kolei prowadzi do powstania w uzwojeniu znacznych naprężeń elektrycznych, wynikających z dużego gradientu potencjału panującego w obrębie początkowych cewek uzwojenia. Należy zwrócić uwagę na fakt, że maksymalna wartość napięcia zarejestrowana w punkcie  $x/l=0,75$  osiągała wartość zbliżoną do wartości szczytowej udaru doprowadzonego do cewki, podobnie jak w przypadku wymuszenia udarem prostokątnym. Jest to efektem działania wysokoczęstotliwościowych drgań napięcia w uzwojeniu.



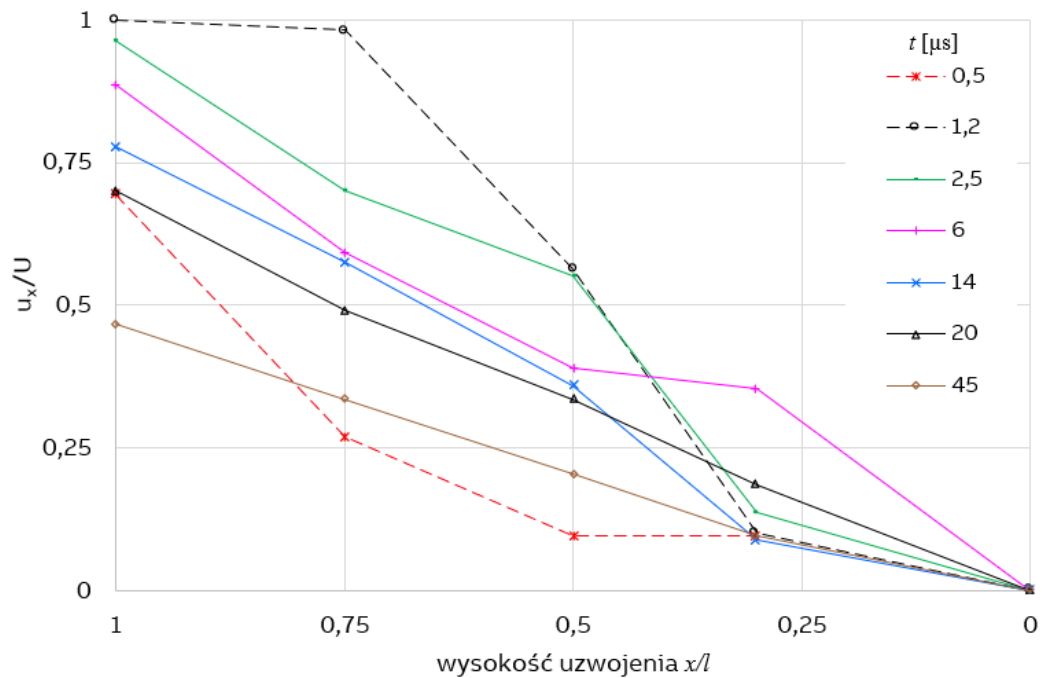
Rys. 8.9 Rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia cewkowego 110 kV przy wymuszeniu udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s: 1 – rozkład pseudo-początkowy, 2 – rozkład końcowy, 3 - rozkład przebiegów maksymalnych;  $x/l=1$  – początek uzwojenia,  $x/l=0$  – koniec uzwojenia

Na podstawie wyznaczonych rozkładów przebiegów maksymalnych można stwierdzić, że największym narażeniem przebiegowym jest poddana izolacja początkowych cewek uzwojenia (od  $x/l=1,0$  do ok.  $x/l=0,75$ ), co jest w zgodzie z wyznaczonym rozkładem pseudo-początkowym, którego największa stromość występuje właśnie w tym obszarze. W dalszej części uzwojenia, rozkład przebiegów maksymalnych zbliża się do rozkładu końcowego, aż do osiągnięcia uziemionego końca uzwojenia. W żadnym z badanych punktów, przebiegi nie przekraczają wartości szczytowej udaru doprowadzonego do uzwojenia. Należy wspomnieć, że rozkład pseudo-początkowy został wyznaczony na podstawie pomiarów przebiegów napięcia jedynie w czterech punktach uzwojenia, dlatego należy oczekiwać, że rzeczywisty gradient napięcia wzdłuż początkowych cewek jest większy, niż zaprezentowano na Rys. 8.9.

W celu dokładniejszej analizy zjawisk zachodzących w uzwojeniu w czasie oddziaływania napięcia udarowego piorunowego 1,2/50  $\mu$ s, wyznaczono chwilowe rozkłady napięcia w uzwojeniu cewkowym panujące w różnych chwilach czasu  $t$  (Rys. 8.10).

Analizując chwilowe rozkłady napięcia w uzwojeniu cewkowym, przy oddziaływaniu udaru piorunowego 1,2/50  $\mu$ s, można zauważyć, że wartości i rozkłady napięć wzdłuż uzwojenia zmieniały się wraz z czasem oddziaływania wymuszenia udarowego. W początkowej fazie oddziaływania napięcia udarowego, rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia były podyktowane oscylacjami wysokoczęstotliwościowymi i zmieniały się bardzo szybko, co można zaobserwować przyglądając się rozkładom w chwilach:  $t=0,5 \mu$ s,  $1,2 \mu$ s i  $2,5 \mu$ s. W chwili  $t=0,5 \mu$ s, rozkład miał charakter pojemnościowy, natomiast w chwili przechodzenia udaru przez jego wartość szczytową, kształt rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia był zupełnie inny - napięcia w punkcie  $x/l=0,75$  osiągały poziom zbliżony do wartości maksymalnej udaru, po czym malały zbliżając się do końca uzwojenia. Świadczy to o szybkim procesie

wyrównywania się rozkładu początkowego w analizowanym uzwojeniu. Oscylacje wysokoczęstotliwościowe wytłumiały się po czasie  $5 \mu\text{s}$  i o rozkładach chwilowych napięcia decydowały już głównie drgania własne uzwojenia, widoczne szczególnie w punktach  $x/l=0,5$  oraz  $x/l=0,3$ . Wpływ tych drgań jest widoczny na rozkładach w chwilach czasu  $t=6 \mu\text{s}$ ,  $14 \mu\text{s}$  oraz  $20 \mu\text{s}$ . Rozkłady napięcia w chwilach  $t=14 \mu\text{s}$  i  $20 \mu\text{s}$  niewiele odbiegają od liniowych, ale nadal jest to stan nieustalony. Dopiero po wytłumieniu się drgań własnych w uzwojeniu, w chwili  $t=45 \mu\text{s}$ , rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia można uznać za ustalony i liniowy, co jest w zgodzie z analizami przeprowadzonymi przy wymuszeniu udarem prostokątnym.



Rys. 8.10 Chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia cewkowego 110 kV przy wymuszeniu udarem piorunowym 1,2/50  $\mu\text{s}$  – rozkłady obejmują chwile czasu  $t$  w zakresie 0,5  $\mu\text{s}$  – 45  $\mu\text{s}$ ;  $x/l=1$  – początek uzwojenia,  $x/l=0$  – koniec uzwojenia

Porównując wyniki analizy zjawisk przebiegowych w uzwojeniu o konstrukcji cewkowej, przy wymuszeniu udarem prostokątnym o bardzo dużej stromości oraz udarem piorunowym o łagodniejszym zboczu narastającym, można wyciągnąć zbieżne i użyteczne do dalszych analiz wnioski.

Przeprowadzone analizy potwierdziły, że narażenia przebiegiowe wewnętrznego układu izolacyjnego badanego transformatora różnią się w zależności od obszaru uzwojenia i nie mogą być oceniane jedynie na podstawie wartości szczytowej napięcia udarowego. Ze względu na reakcję uzwojenia na pojawiające się przebiegi, wynikającą z jego parametrów  $RLC$  oraz kształtu doprowadzonego udaru, do wiarygodnej oceny narażeń przebiegowych konieczna jest wiedza o przebiegach przebiegów wewnątrz uzwojeń. Bardzo istotna jest w tym wypadku stromość narastania udaru, która powoduje powstanie w uzwojeniu bardzo nieliniowego rozkładu początkowego prowadzącego do drgań wyrównawczych o wysokich częstotliwościach, mogących doprowadzić do niebezpiecznych przebiegów, w przypadku zbliżenia się częstotliwości oscylacji do częstotliwości rezonansowej uzwojenia. Z tego względu, narażenia przebiegiowe powinny być rozważane indywidualnie dla każdej konstrukcji uzwojenia.

### 8.3 Wyznaczanie rozkładów początkowych potencjału w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego

W rozdziale 8.2 przedstawiona została eksperymentalna analiza rozkładu przepięć w rzeczywistym uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego przy wymuszeniu udarami o dwóch różnych kształtach. Na podstawie pomiarów charakterystyk czasowych przepięć w wybranych punktach uzwojenia wyznaczono i porównano rozkłady: pseudo-początkowy oraz rozkład maksymalnych wartości napięcia w uzwojeniu przy wymuszeniu udarem prostokątnym oraz znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s.

W celu lepszego zbadania narażeń przepięciowych panujących w uzwojeniu podczas oddziaływania napięć udarowych, analizę eksperymentalną rozszerzono o analizę symulacyjną rozkładu potencjału elektrostatycznego oraz natężenia pola elektrycznego w uzwojeniu. Przyjęto założenie, że rozkład potencjału elektrostatycznego odzwierciedla początkowy, czysto pojemnościowy rozkład napięcia w uzwojeniu, w początkowej chwili oddziaływania napięcia udarowego, natomiast rozkład natężenia pola elektrycznego odzwierciedla rozkład naprężeń elektrycznych panujących w uzwojeniu. Analizowano przede wszystkim wpływ topologii uzwojenia cewkowego (różne rodzaje przeplatania zwojów) i zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na zmianę kształtu rozkładu potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu oraz na zmniejszenie narażeń przepięciowych. Badano również wpływ częściowego splatania zwojów w uzwojeniu oraz rozkłady w uzwojeniu z końcem izolowanym i uziemionym. Ze względu na zastosowane uproszczenia, różnice w geometrii i parametrach materiałowych modelu i rzeczywistego obiektu oraz fakt, że rozkład czysto pojemnościowy jest pojęciem teoretycznym, analizę należy traktować głównie jakościowo i jako uzupełnienie analizy eksperymentalnej.

#### 8.3.1 Model uzwojenia cewkowego i metodologia obliczeń

Obiektem analizy był rzeczywisty model uzwojeń jednej fazy transformatora energetycznego o napięciu 110 kV / 15 kV i mocy 25 MVA, o konstrukcji przedstawionej na Rys. 8.2. Rzeczywiste uzwojenie posiadało następujące elementy:

- uzwojenie DN – typu warstwowego, zawierające 4 warstwy po 40 zwojów każda,
- uzwojenie GN – składające się z 50 cewek, zawierających po 20 zwojów każda, nawiniętych przewodem o przekroju prostokątnym, w izolacji papierowej o grubości 1,2 mm (dwustronnie). Uzwojenie GN było zbudowane jako przeplatane – składało się zatem z zestawu 25 dwucewek splatanych (rodzaj przeplotów nie jest znany i nie było możliwości zweryfikowania sposobu przeplatania).

Model symulacyjny został utworzony na podstawie danych konstrukcyjnych uzwojenia. Obliczenia przeprowadzono w programie *COMSOL Multiphysics* ver.5.6 (*AC/DC – Electrostatics*) - zastosowano model dwuwymiarowy o symetrii osiowej. Charakterystykę modułu obliczeniowego w środowisku *COMSOL Multiphysics* przedstawiono w rozdziale 6.2.

Praca obejmowała symulacje rozkładu potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym dla różnych sposobów przeplatania zwojów w cewkach oraz po wprowadzeniu pierścienia ekwipotencjalnego. Analizowano również uzwojenie, w którym przeploty obejmowały tylko początkową część uzwojenia (w pobliżu zacisku liniowego) oraz badano wpływ uziemienia i izolowania końca uzwojenia na powstające rozkłady początkowe potencjału. Uzwojenie DN, które w czasie badań miało zwarte i uziemione końce, było traktowane jako jednolity element odpowiadający wymiarom rzeczywistego uzwojenia (powierzchnia ekwipotencjalna na potencjale  $V=0$  V).

W modelu obliczeniowym, uzwojenie było traktowane jako zbiór izolowanych od siebie pierścieni, o potencjałach narzuconych warunkami brzegowymi oraz wynikających z rozkładu pola elektrostatycznego w geometrii modelu. Każdy zwój stanowił w modelu oddzielną powierzchnię ekwipotencjalną. Wyjątek stanowiły zwoje, w których następowało przejście drutu nawojowego pomiędzy cewkami. Przejścia pomiędzy cewkami traktowano jako zwarcie (narzucony jednakowy potencjał na dwóch zwojach), a nie jako przerwę. Na potrzeby analizy założono, że wszystkie przejścia pomiędzy cewkami znajdują się w tym samym miejscu na obwodzie uzwojenia. Biorąc pod uwagę, że model symulacyjny został stworzony w przestrzeni 2D osiowosymetrycznej, wprowadzało to pewne uproszczenie (model traktował, że połączenie pomiędzy cewkami zrealizowane jest na całym obwodzie cewki). Z tego względu, postawiono główny nacisk na analizę jakościową, a nie ilościową wpływu przeplotów na zmianę rozkładu pojemnościowego w uzwojeniu. Podobnie jak w przypadku symulacji uzwojenia wielowarstwowego (rozdział 7.3), zakładano że potencjały zwojów łączących poszczególne cewki wyrównują się na poziomie zbliżonym do ich średniej arytmetycznej, otrzymanych w symulacji bez uwzględniania połączeń międzycewkowych. Wszystkie pozostałe zwoje w uzwojeniu, poza pierwszym i ostatnim (gdzie były narzucone warunki brzegowe – *Electric potential* i *Ground*), znajdowały się na pływającym potencjale i były ze sobą sprzężone pojemnościowo (warunek brzegowy – *Floating potential group*). Rozkład potencjału elektrostatycznego w modelu uzwojenia wynikał z narzuconych w symulacji warunków brzegowych, parametrów materiałowych oraz geometrii modelu.

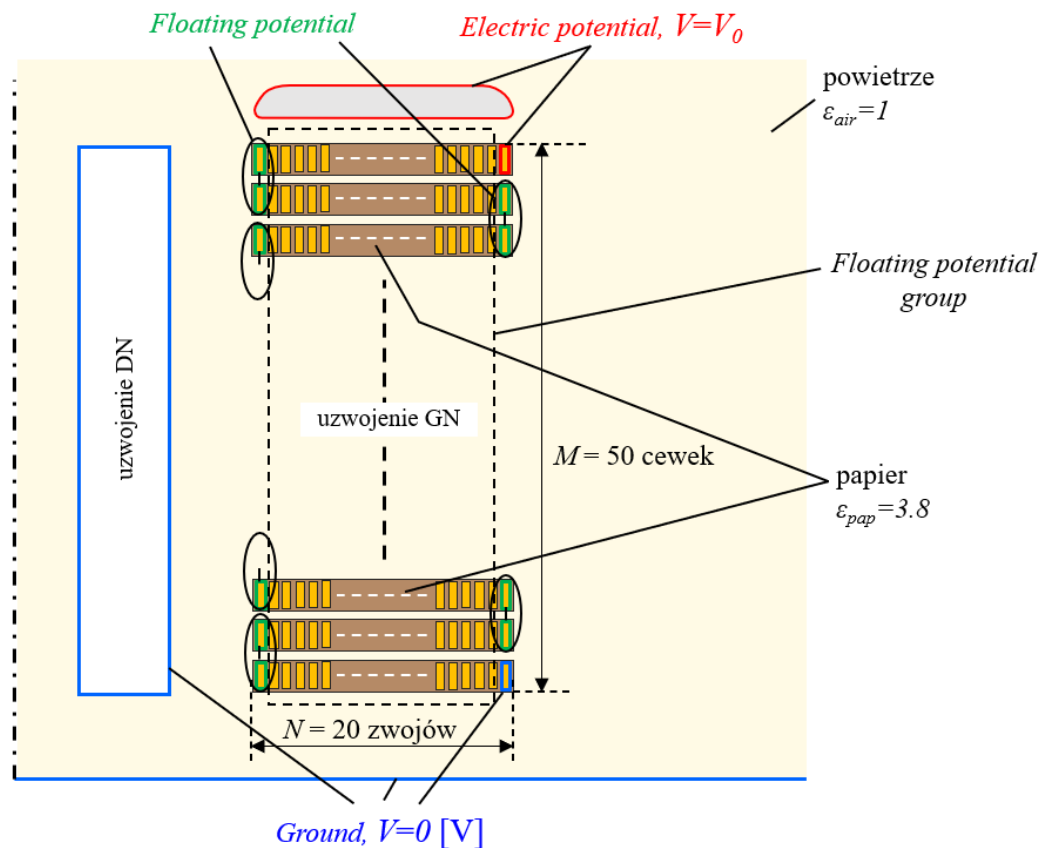
W modelu symulacyjnym, pierwszy zwój w cewce pierwszej posiadał potencjał  $V_0=1$  V (wartość przyjęta na potrzeby symulacji), natomiast ostatni zwój w cewce ostatniej był uziemiony ( $V=0$  V). Graficzne przedstawienie warunków brzegowych zastosowanych w symulacjach zostało przedstawione Rys. 8.11, na przykładzie klasycznego uzwojenia wywrotkowego. W przypadku analizy wpływu przeplatania na rozkłady potencjału i pola elektrycznego, stosowano krzyżowe „połączenia” *Floating potential* pomiędzy zwojami. Charakterystyka poszczególnych warunków brzegowych zastosowanych w symulacjach została przedstawiona w rozdziale 6.2.

W symulacji uwzględniono wpływ pojemności do uziemionych elementów, które były obecne w czasie pomiarów na rzeczywistym obiekcie – uzwojenia DN i podłogi laboratorium. Uzwojenie DN traktowano jako uziemiony, wydrążony cylinder, znajdujący się wewnątrz tulei uzwojenia GN.



Parametry materiałowe zastosowane w symulacjach odzwierciedlały warunki w jakich badane było uzwojenie. Określały one stałą dielektryczną materiałów izolacyjnych oraz ośrodka w jakim wykonywane były pomiary:

- powietrze:  $\epsilon_{air}=1$ ,
- papier:  $\epsilon_{pap}=3,8$ .



Rys. 8.11 Warunki brzegowe i parametry materiałowe dla symulacji rozkładu potencjału elektrycznego w uzwojeniu cewkowym wywrotkowym (bez przeplatania zwojów)

W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych oraz analizę wpływu: różnych rodzajów przeplatania zwojów pomiędzy cecami, przepłotów częściowych oraz zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na zmianę rozkładów pojemnościowych i narażeń elektrycznych w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego. Badano również wpływ izolowania i uziemienia końca uzwojenia na rozkłady początkowe w uzwojeniu.

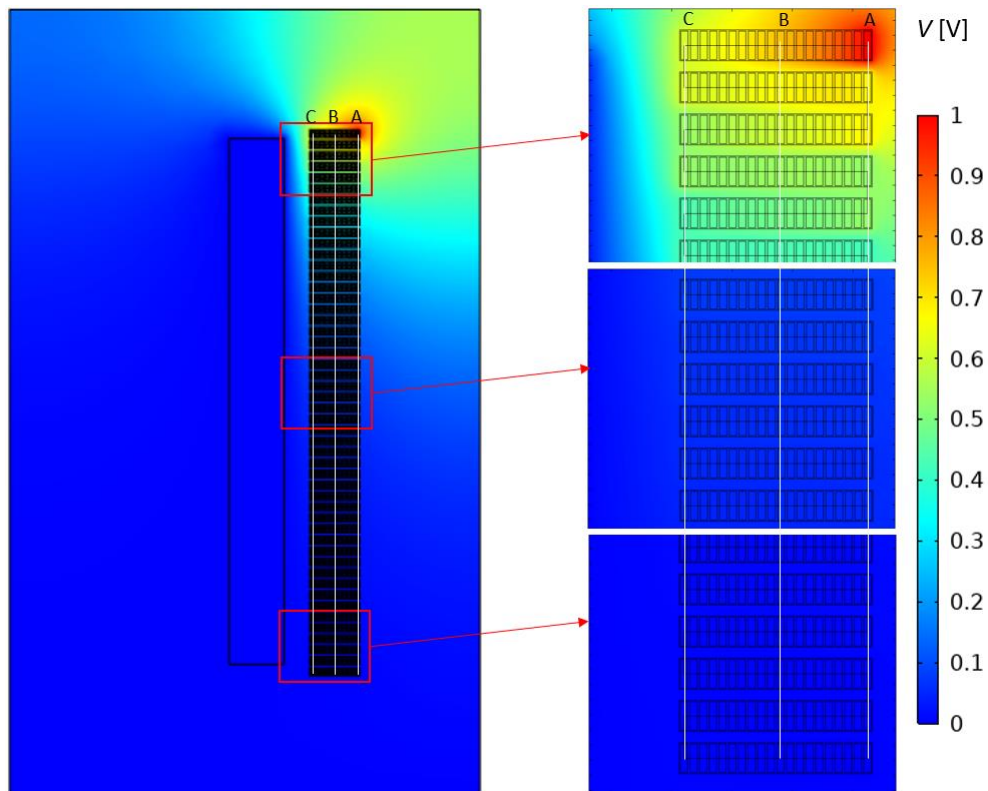
### 8.3.2 Uzwojenie wywrotkowe

Analizie symulacyjnej poddano uzwojenie cewkowe o konstrukcji wywrotkowej (Rys. 4.4), czyli uzwojenie nawinięte jednym drutem nawojowym naprzemiennie do wewnątrz i na zewnątrz. W modelu symulacyjnym zwoje uzwojenia traktowane były jak izolowane pierścienie o potencjale wynikającym z narzuconych warunków brzegowych oraz geometrii układu. Poszczególne zwoje przyjmowały zatem potencjały przecinających je linii

ekwipotencjalnych. Zewnętrzny zwoj pierwszej cewki (licząc od góry) znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast zewnętrzny zwoj cewki ostatniej (dolnej) był uziemiony ( $V=0$  V). Wymuszenie o wartości 1 V przyjęto na potrzeby obliczeń, ze względu na łatwość odczytywania wyników w wartościach względnych  $V_x/V_0$  bez dodatkowych przeliczeń. Otrzymane wartości natężenia pola elektrycznego  $E$  są wyrażone w [V/m] dla jednostkowego wymuszenia potencjałem  $V_0=1$  V. W celu oszacowania naprężeń dla rzeczywistych wartości wymuszeń należy otrzymane wartości  $E$  pomnożyć przez rzeczywistą wartość potencjału  $V_0$  (w stosunku do wartości 1 V).

Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wyznaczono rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od wewnątrz, w środku i na zewnątrz (linie A, B i C na Rys. 8.12).

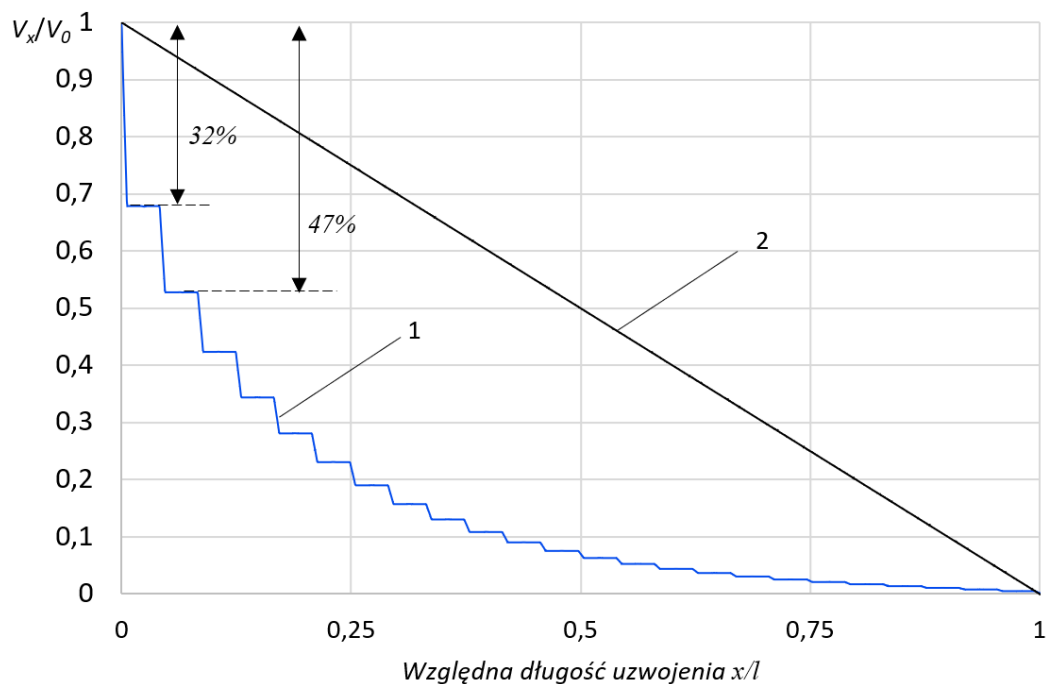
Na Rys. 8.12 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Takie przedstawienie wyraźnie wskazuje na różnice w rozkładzie potencjałów panujących w różnych obszarach uzwojenia. Cewki górne (początkowe) znajdują się w silnym polu elektrycznym pochodzącym od pierwszego, zasilanego zwoju uzwojenia; natomiast w środkowej oraz dolnej części uzwojenia, potencjały zwojów są bliskie potencjałowi ziemi. W tych obszarach gradient potencjału jest niewielki.



Rys. 8.12 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wywrotkowym

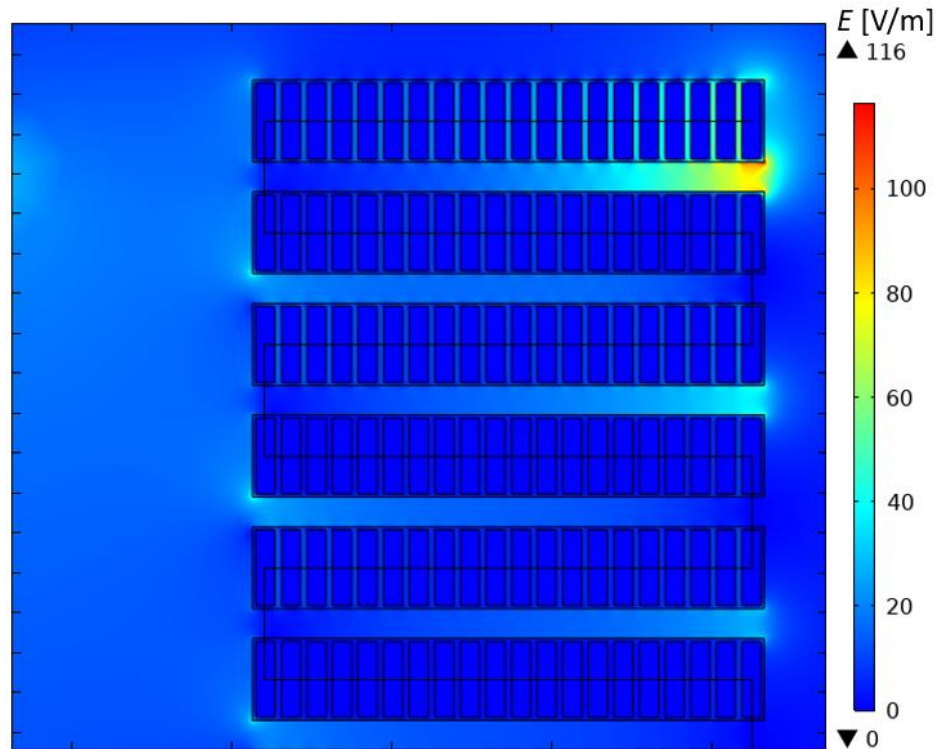
Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia (po zewnętrznej krawędzi – linia przecięcia A) ma charakter czysto pojemnościowy i jest silnie nieliniowy (Rys. 8.13). Wynika to ze sprzężenia wewnętrznych zwojów wszystkich cewek uzwojenia (na całej jego wysokości) do uziemionego uzwojenia dolnego napięcia. Rozkład początkowy przedstawiono

na tle idealnego rozkładu końcowego – rozkłady te znacząco się różnią. Takie różnice mogą prowadzić do powstania w uzwojeniu przebiegów wyrównawczych o bardzo dużych wartościach maksymalnych. Można zauważyć bardzo duże gradienty potencjału występujące wzdłuż początkowych cewek uzwojenia (na ich izolacji wzdłużnej). Na pierwszych pięciu cewkach uzwojenia potencjał spada o ok. 47% w stosunku do wartości wymuszenia  $V_0$ ; co powoduje powstanie bardzo dużych naprężeń pomiędzy sąsiadującymi cewkami – szczególnie pierwszymi dwoma, pomiędzy którymi potencjał spada o 32%  $V_0$ . Potwierdza to również rozkład natężenia pola elektrycznego w górnej części uzwojenia przedstawiony na Rys. 8.14, w którym można zauważyć największe naprężenia pomiędzy pierwszymi dwoma cewkami uzwojenia, w okolicach ich zewnętrznych zwojów. Gradient potencjału elektrostatycznego, a więc również naprężenia elektryczne maleją wraz z oddalaniem się od zasilanego zwoju w uzwojeniu. W środkowej i dolnej części uzwojenia naprężenia elektryczne są niewielkie, dlatego nie przedstawiono ich rozkładu.

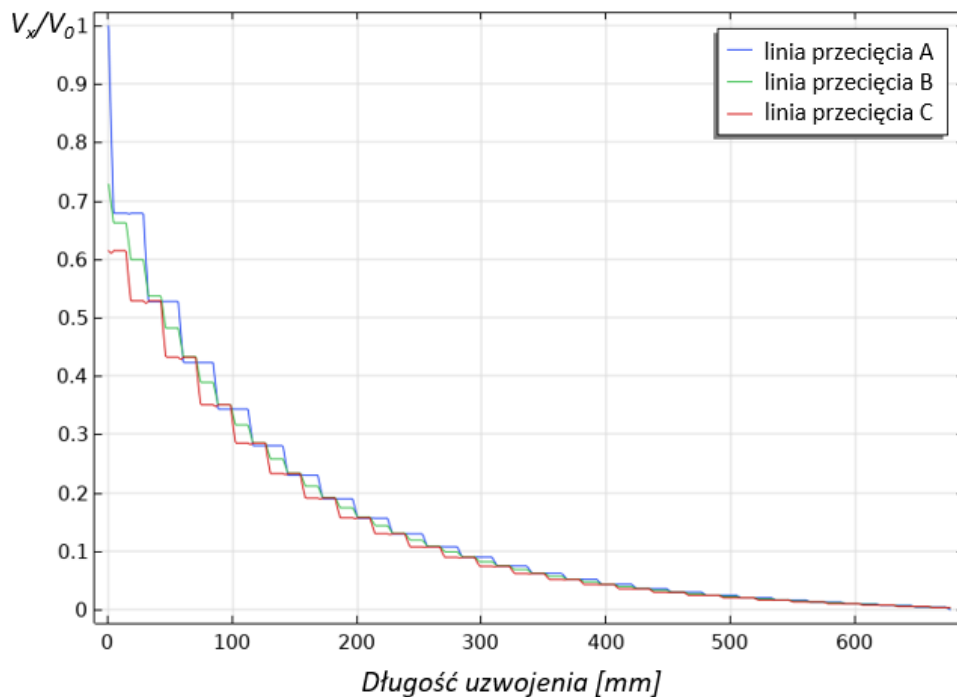


Rys. 8.13 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego wywrotkowego (linia przecięcia A na Rys. 8.12); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech pionowych linii przecięć (A, B, C – Rys. 8.12) przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, zewnętrznej i w środku uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.15. Można zauważyć, że rozkłady te mają taki sam, pojemnościowy charakter, ale ich stromości się różnią. Po wewnętrznej stronie uzwojenia, gradienty potencjału są najmniejsze, a po zewnętrznej największe. Z tego względu najbardziej naprężane są obszary zewnętrznych krawędzi cewek uzwojenia.



Rys. 8.14 Rozkład natężenia pola elektrycznego w obrębie sześciu wstępnych cewek analizowanego uzwojenia wywrotkowego



Rys. 8.15 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojenia wywrotkowym wzdłuż linii przecięcia A, B i C (Rys. 8.12)

Podsumowując analizę uzwojenia wywrotkowego, należy stwierdzić, że krytyczny pod względem zagrożeń przepięciowych jest obszar początkowych cewek uzwojenia, szczególnie izolacja wzdłużna pomiędzy pierwszymi dwoma cewkami. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części uzwojenia, w przypadku stosowania tego typu konstrukcji.

### 8.3.3 Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem Chadwicka-Stearna

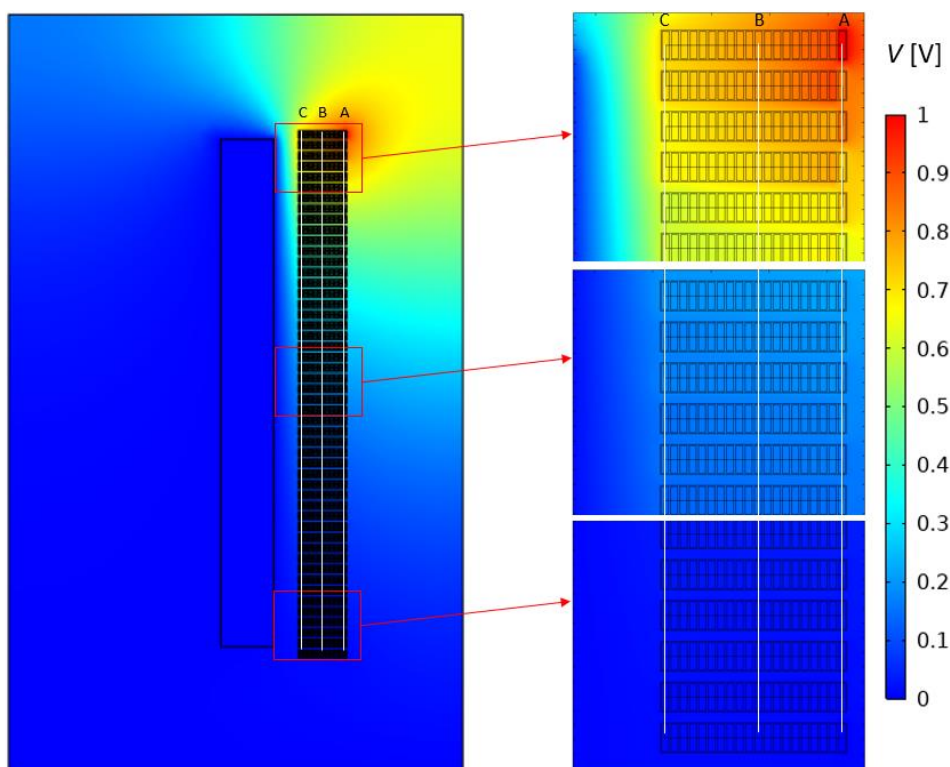
W kolejnym kroku przeanalizowano uzwojenie cewkowe z przeplotami sposobem Chadwicka-Stearna (Rys. 4.6a). W tej konstrukcji, uzwojenie nawija się dwoma równoległymi przewodami i przeplata zwoje w odpowiedniej kolejności. Zasada tej koncepcji polega na geometrycznym zbliżeniu do siebie zwojów, które są elektrycznie znacznie od siebie oddalone. Pozwala to zgromadzić znacznie większą energię w przestrzeniach międzyzwojowych w porównaniu do uzwojenia wywrotkowego, przez co konstrukcyjnie zwiększa się pojemność szeregowa uzwojenia.

W analizie założono, że zewnętrzny zwój pierwszej cewki (licząc od góry) znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast zewnętrzny zwój cewki ostatniej (dolnej) był uziemiony ( $V=0$  V). Pary zwojów, w których następowało przejście pomiędzy cewkami, znajdowały się na jednakowym pływającym potencjale wynikającym z narzuconych warunków brzegowych i geometrii uzwojenia zgodnie z zasadą przedstawioną w rozdziale 8.3.1.

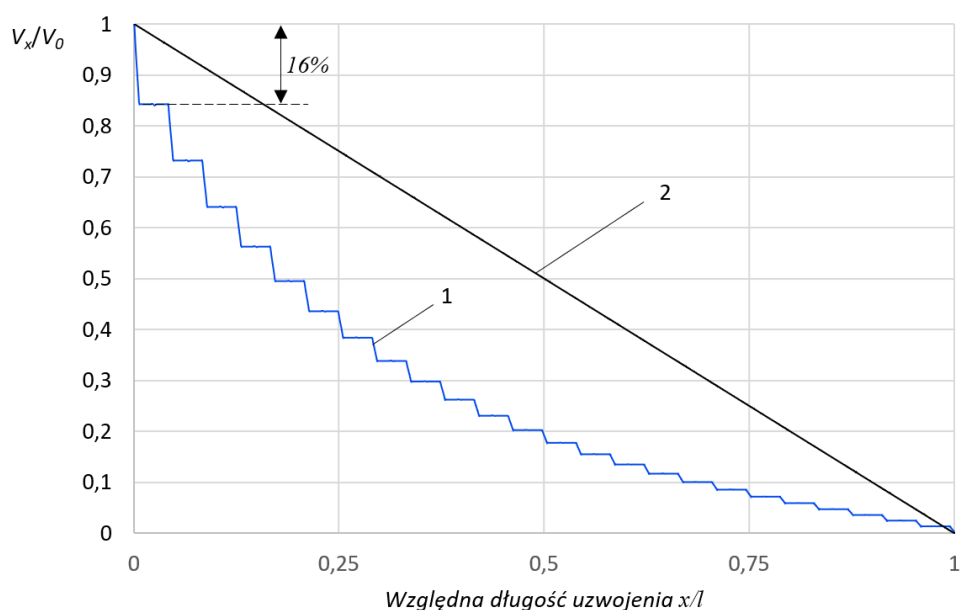
Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przecięć przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od wewnątrz, w środku i na zewnątrz (linie A, B i C na Rys. 8.16).

Na Rys. 8.16 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Takie przedstawienie wyraźnie wskazuje na różnice w rozkładzie potencjałów panujących w różnych obszarach uzwojenia. Cewki górne (początkowe) znajdują się w silnym polu elektrostatycznym pochodzącym od pierwszego, zasilanego zwoju uzwojenia, natomiast w dolnej części uzwojenia, potencjały zwojów są bliskie potencjałowi ziemi. Zwoje znajdujące się w połowie wysokości uzwojenia przyjmują potencjały pośrednie pomiędzy cewkami górnymi i dolnymi. Największe gradienty potencjału występują w górnej części uzwojenia, w części środkowej są znacznie mniejsze, a w dolnej są bardzo niewielkie. Pomędzy pierwszymi dwoma cewkami spadek wartości potencjału elektrostatycznego wynosi ok. 16% wartości  $V_0$  i jest dwukrotnie mniejszy niż w przypadku uzwojenia wywrotkowego (32% na Rys. 8.13), co przekłada się również na znacznie mniejsze naprężenia pomiędzy dwoma pierwszymi cewkami.

Rozkład potencjału wzdłuż uzwojenia (po zewnętrznej krawędzi – linia przecięcia A na Rys. 8.16) ma charakter pojemnościowy i jest nieliniowy (Rys. 8.17), ale w znacznie mniejszym stopniu niż w uzwojeniu wywrotkowym, dzięki czemu przebiegi wyrównawcze będą osiągały mniejsze wartości maksymalne. Świadczy to o słuszności stosowania przepleceń w celu zbliżenia do siebie rozkładu początkowego i końcowego. Gradienty potencjału pomiędzy cewkami są największe w obrębie wstępnych cewek i maleją wraz z oddalaniem się od zacisku liniowego uzwojenia, co potwierdza również rozkład natężenia pola elektrostatycznego przedstawiony na Rys. 8.18.



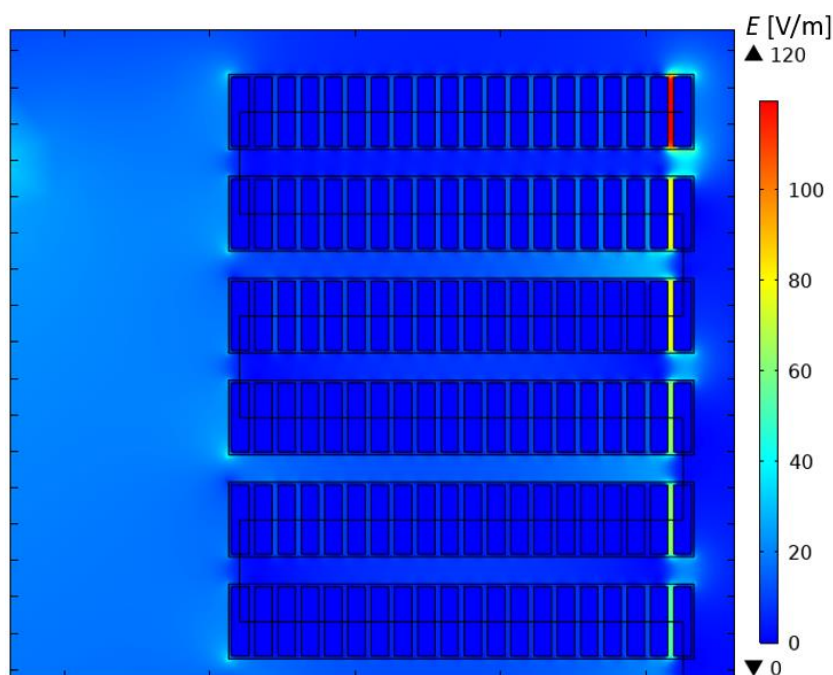
Rys. 8.16 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z przeplotami wg sposobu Chadwicka-Stearna



Rys. 8.17 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego z przeplotami Chadwicka-Stearna (linia przecięcia A na Rys. 8.16); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

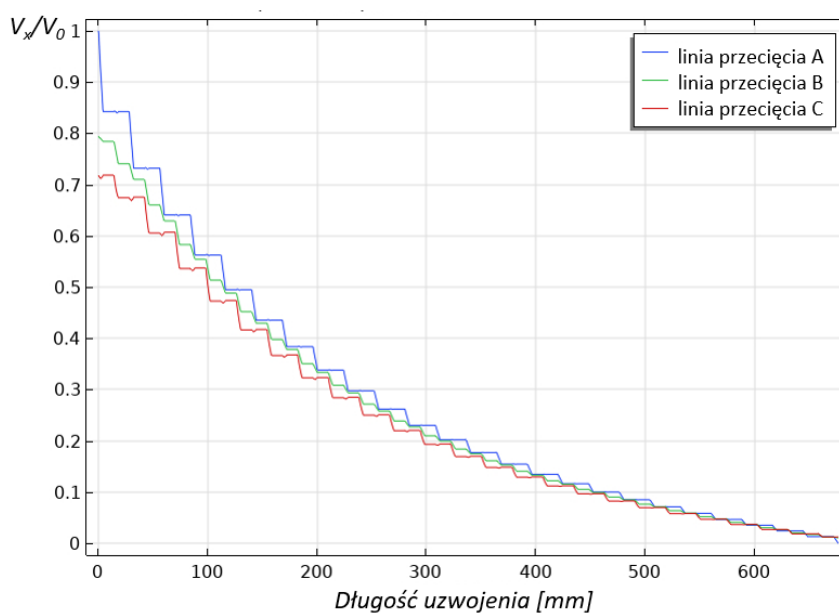
Największe naprężenia elektryczne panują w przestrzeni międzyzwojowej w pierwszej cewce (Rys. 8.18), co wynika bezpośrednio z przeplatania zwojów pomiędzy cewkami i geometrycznego zbliżenia zwojów, znacznie oddalonych od siebie elektrycznie (zmiana kolejności nawinięcia zwojów w uzwojeniu). W tej sytuacji może zachodzić konieczność zastosowania grubszej izolacji w początkowych cewkach, co będzie miało również wpływ na zmianę pojemności szeregową tego obszaru i spowoduje osłabienie efektu przeplatania

zwojów. W środkowej i dolnej części uzwojenia, naprężenia są niewielkie i z tego względu nie zostały pokazane.



Rys. 8.18 Rozkład natężenia pola elektrycznego w obrębie sześciu wstępnych cewek uzwojenia z przeplotami Chadwicka-Stearna

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech pionowych linii przecięć (A, B, C – Rys. 8.16) przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, zewnętrznej i w środku uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.19. Podobnie jak w przypadku uzwojenia wywrotkowego, poszczególne rozkłady mają pojemnościowy charakter, ale ich stromości różnią się w zależności od lokalizacji w uzwojeniu – największe stromości występują na zewnętrznej, a najmniejsze na wewnętrznej stronie uzwojenia, co wynika z wpływu pobliskiego, uziemionego uzwojenia DN od strony średnicy wewnętrznej.



Rys. 8.19 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym z przeplotami Chadwicka-Stearna wzdłuż linii przecięć A, B i C (Rys. 8.16)

W uzwojeniu cewkowym z przeplotami sposobem Chadwicka-Stearna, krytyczny pod względem zagrożeń przepięciowych jest obszar początkowych cewek uzwojenia, szczególnie w przestrzeni międzyzwojowej w pierwszej cewce. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części uzwojenia, w przypadku stosowania tego typu konstrukcji.

### 8.3.4 Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem Kratochwila

Kolejnym przypadkiem, który poddano analizie symulacyjnej było uzwojenie cewkowe z przeplotami sposobem Kratochwila (Rys. 4.6b). Podobnie jak w przypadku uzwojenia z przeplotami metodą Chadwicka-Stearna, uzwojenie to nawija się dwoma równoległymi przewodami, które są przeplatane pomiędzy cewkami w odpowiedniej kolejności, aby konstrukcyjnie zwiększyć pojemność szeregową uzwojenia.

W analizie założono, że drugi od zewnątrz zwój pierwszej cewki (licząc od góry) znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V (zgodnie ze schematem nawijania z Rys. 4.6b), natomiast drugi od zewnątrz zwój cewki ostatniej (dolnej) był uziemiony ( $V=0$  V). Pary zwojów, w których następowało przejście pomiędzy cewkami, znajdowały się na jednakowym pływającym potencjale wynikającym z narzuconych warunków brzegowych i geometrii uzwojenia zgodnie z zasadą przedstawioną w rozdziale 8.3.1. Wartość potencjału tych zwojów była na poziomie średniej arytmetycznej potencjałów obu zwojów, jeśli nie uwzględnić ich połączenia.

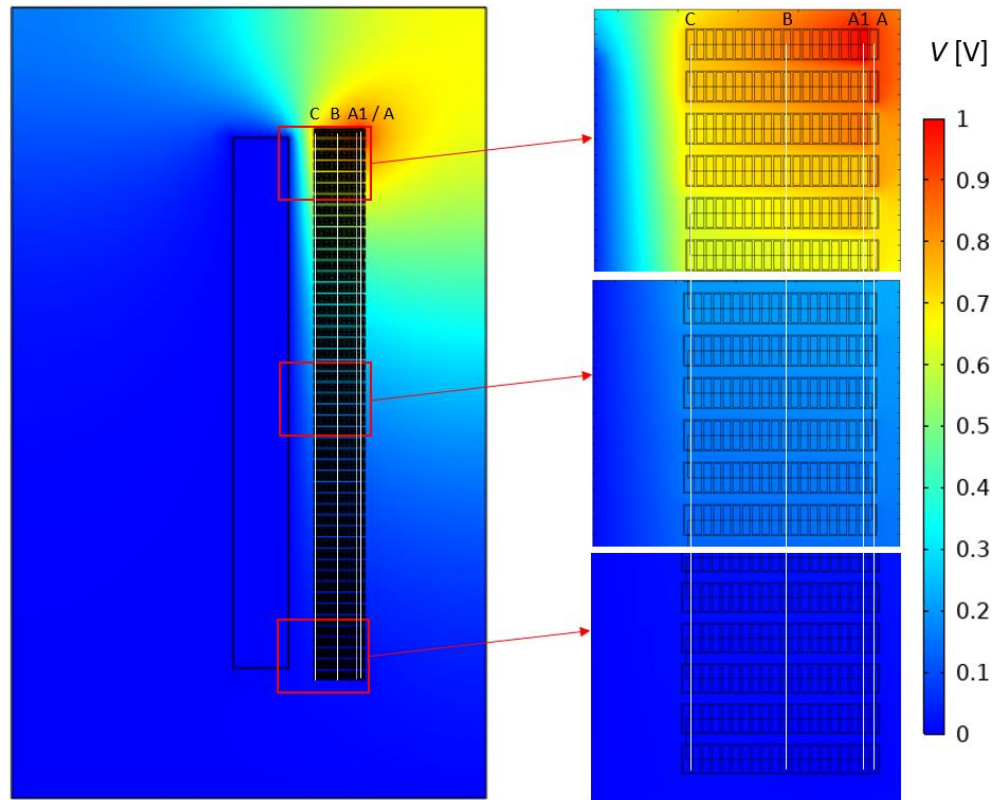
Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż czterech linii przecięć przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od wewnątrz, w środku i na zewnątrz (linie A, AI, B, C na Rys. 8.20).

Na Rys. 8.20 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Wyraźnie widać różnice w rozkładzie potencjału elektrostatycznego panującego w różnych obszarach uzwojenia. Cewki górne (początkowe) znajdują się w silnym polu elektrostatycznym pochodzącym od zwoju znajdującego się na wysokim potencjale, natomiast w dolnej części uzwojenia, potencjały zwojów są bliskie potencjałowi ziemi. Zwoje znajdujące się w połowie wysokości uzwojenia przyjmują potencjały pośrednie pomiędzy cewkami górnymi i dolnymi. Największe gradienty potencjału występują w górnej części uzwojenia, w części środkowej są znacznie mniejsze, a w dolnej są bardzo małe. Pomiedzy pierwszymi dwoma cewkami, maksymalny spadek wartości potencjału elektrostatycznego wynosi 15% wartości potencjału wymuszającego  $V_0$  i jest znacznie mniejszy niż w przypadku uzwojenia wywrotkowego, co przekłada się również na znacznie mniejsze naprężenia pomiędzy dwoma pierwszymi cewkami (w kanale międzycewkowym).

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia (wzdłuż linii AI, która przecina uzwojenie wzdłuż wszystkich drugich od zewnątrz zwojów w cewkach) ma charakter pojemnościowy i jest nieliniowy (Rys. 8.21), ale w znacznie mniejszym stopniu niż w uzwojeniu wywrotkowym, dzięki czemu przebiegi wyrównawcze będą osiągały mniejsze wartości maksymalne. Gradienty potencjału pomiędzy cewkami są największe w obrębie



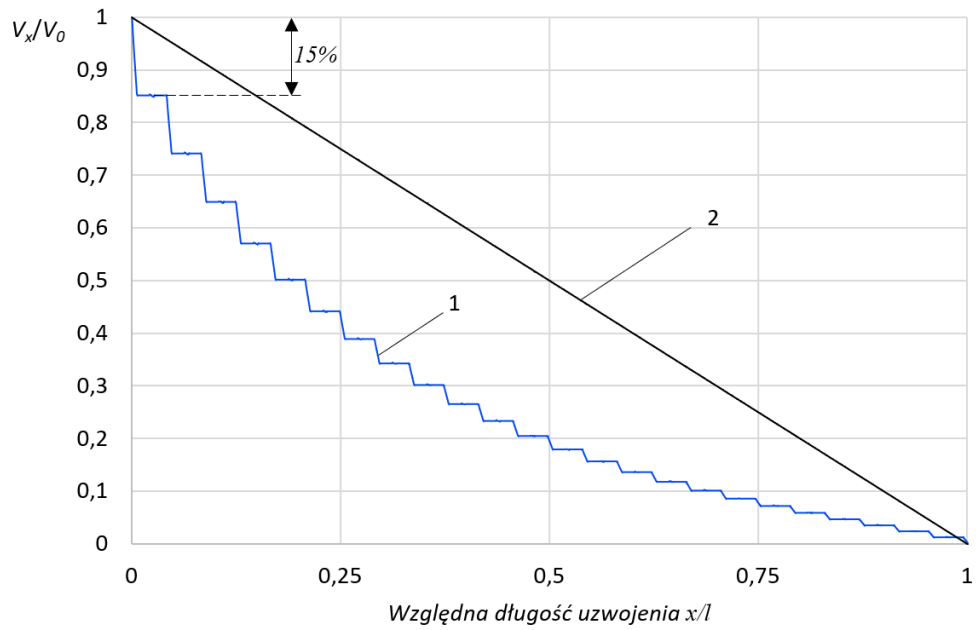
wstępnych cewek i maleją wraz z oddalaniem się od zacisku liniowego uzwojenia. W środkowej i dolnej części uzwojenia, gradienty potencjału są niewielkie, dzięki czemu naprężenia elektryczne pomiędzy cewkami osiągają nieduże wartości. Rozkład potencjału jest bardzo zbliżony do rozkładu panującego w uzwojeniu z przeplotami Chadwicka-Stearna.



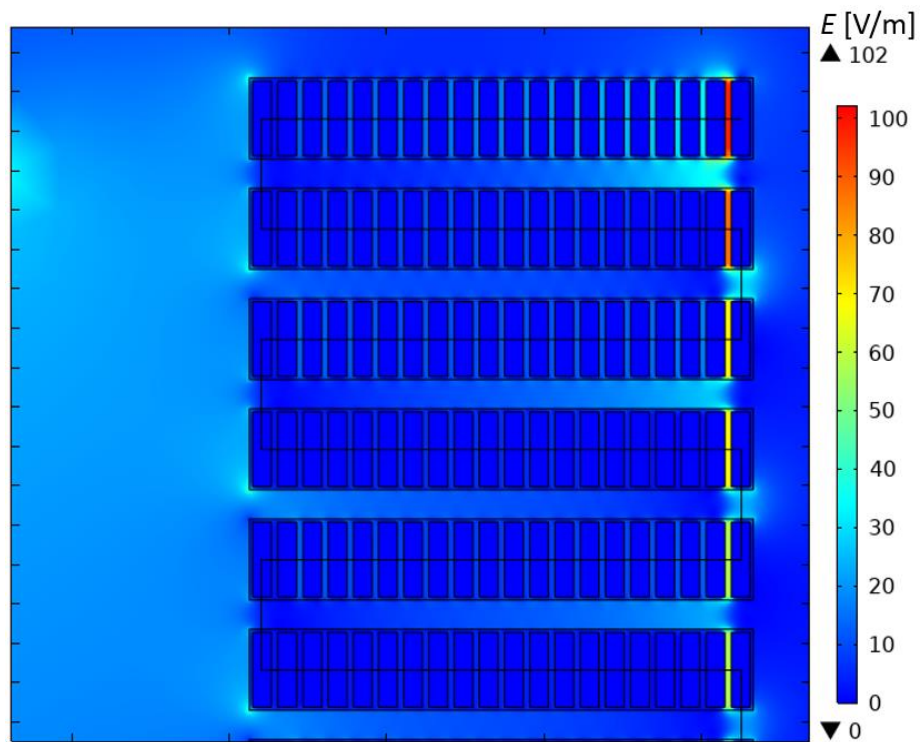
Rys. 8.20 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z przeplotami Kratochwila

Największe naprężenia elektryczne panują w przestrzeni międzyzwojowej pierwszej cewki (Rys. 8.22), co wynika bezpośrednio z przeplatania zwojów pomiędzy cewkami i geometrycznego zbliżenia zwojów, znacznie oddalonych od siebie elektrycznie (zmiana kolejności nawinięcia zwojów w uzwojeniu). W tej sytuacji może zachodzić konieczność zastosowania grubszej izolacji w początkowych cewkach. W środkowej i dolnej części uzwojenia, naprężenia są niewielkie i z tego względu nie zostały przedstawione na rysunku.

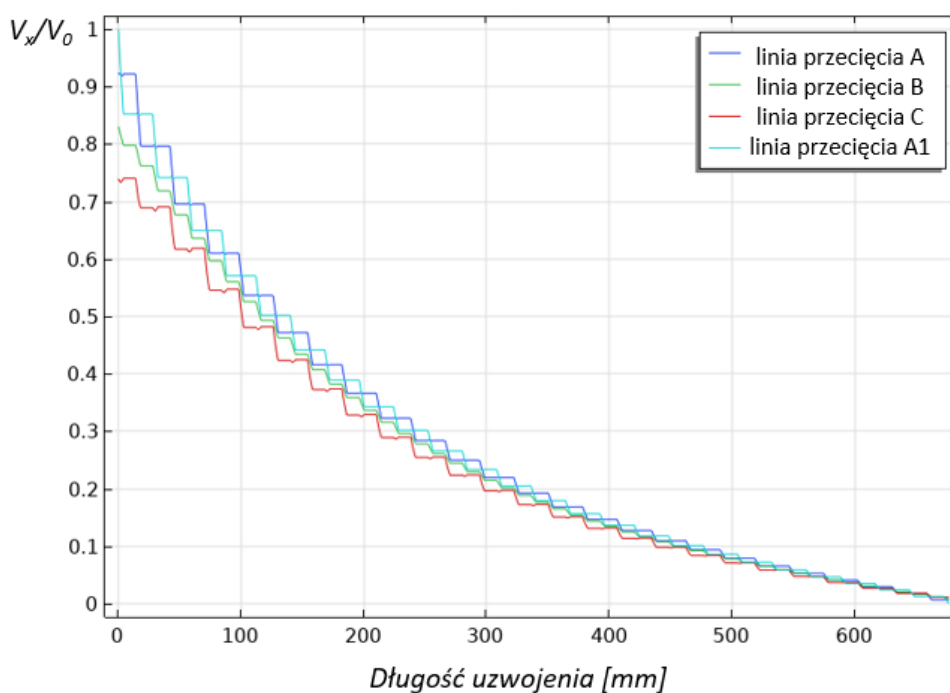
Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż czterech pionowych linii przecięć (A, A1, B, C na Rys. 8.20) przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, zewnętrznej i środka uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.23. Podobnie jak w przypadku uzwojenia wywrotkowego, poszczególne rozkłady mają pojemnościowy charakter, ale ich stromości są różne – największe stromości występują po zewnętrznej stronie, wzdłuż linii A1, przechodzącej przez zwój o potencjale  $V_0$ , a najmniejsze po wewnętrznej stronie uzwojenia.



Rys. 8.21 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego z przeplotami Kratochwila (linia A1 na Rys. 8.20); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia



Rys. 8.22 Rozkład natężenia pola elektrycznego w obrębie sześciu wstępnych cewek uzwojenia z przeplotami Kratochwila



Rys. 8.23 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym z przeplotami Kratochwila wzdłuż linii przecięć A, A1, B, C (Rys. 8.20)

W uzwojeniu cewkowym przeplatany sposobem Kratochwila, krytyczny pod względem zagrożeń przepięciowych jest obszar początkowych cewek uzwojenia, szczególnie w przestrzenie międzyzwojowej w pierwszej cewce. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części uzwojenia, w przypadku stosowania tego typu konstrukcji. Rozkład naprężeń elektrycznych w takiej konstrukcji jest korzystniejszy niż w przypadku uzwojenia wywrotkowego i zbliżony do uzwojenia z przeplotami Chadwicka-Stearna. W odróżnieniu od uzwojenia z przeplotami Chadwicka-Stearna, największe naprężenia międzycewkowe występują pomiędzy drugimi, licząc od zewnątrz, zwojami dwóch początkowych cewek.

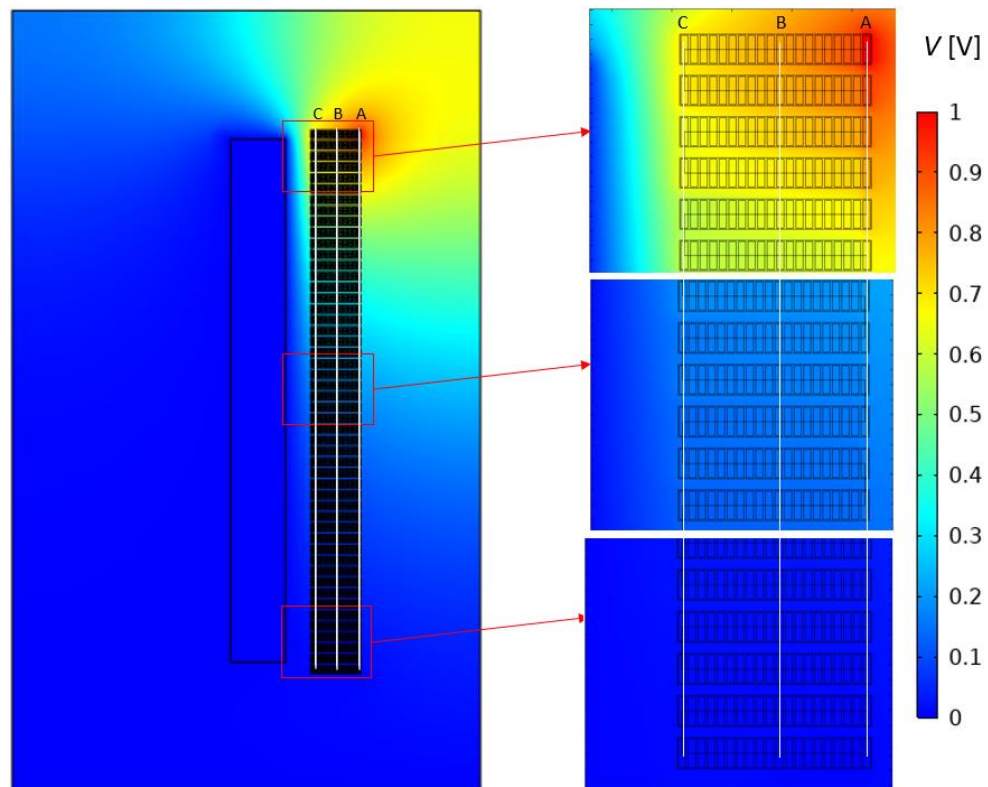
### 8.3.5 Uzwojenie cewkowe przeplatane sposobem van Nuysa

Kolejnym przypadkiem, który poddano analizie symulacyjnej było uzwojenie cewkowe z przeplotami van Nuysa (Rys. 4.6c). Uzwojenie nawinięte zgodnie z tą metodą posiada górną cewkę w dwucewce nawiniętą sposobem Chadwicka-Stearna, a dolną sposobem Kratochwila; z tego względu takie dwucewki nazywane są dwucewkami hybrydowymi.

W analizie założono, że pierwszy zewnętrzny zwój pierwszej cewki (licząc od góry) znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast drugi z kolei zewnętrzny zwój cewki ostatniej (dolnej) był uziemiony -  $V=0$  V (zgodnie ze schematem przepleceń). Pary zwojów, w których następowało przejście pomiędzy cewkami, znajdowały się na jednakowym pływającym potencjale wynikającym z narzuconych warunków brzegowych i geometrii uzwojenia, zgodnie z zasadą przedstawioną w rozdziale 8.3.1. Wartość potencjału tych zwojów była na poziomie średniej arytmetycznej potencjałów tych zwojów, jeśli nie uwzględnić ich połączenia.

Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wykreślono rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przecięć

przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od wewnątrz, w środku i na zewnątrz (linie A, B i C na Rys. 8.24).

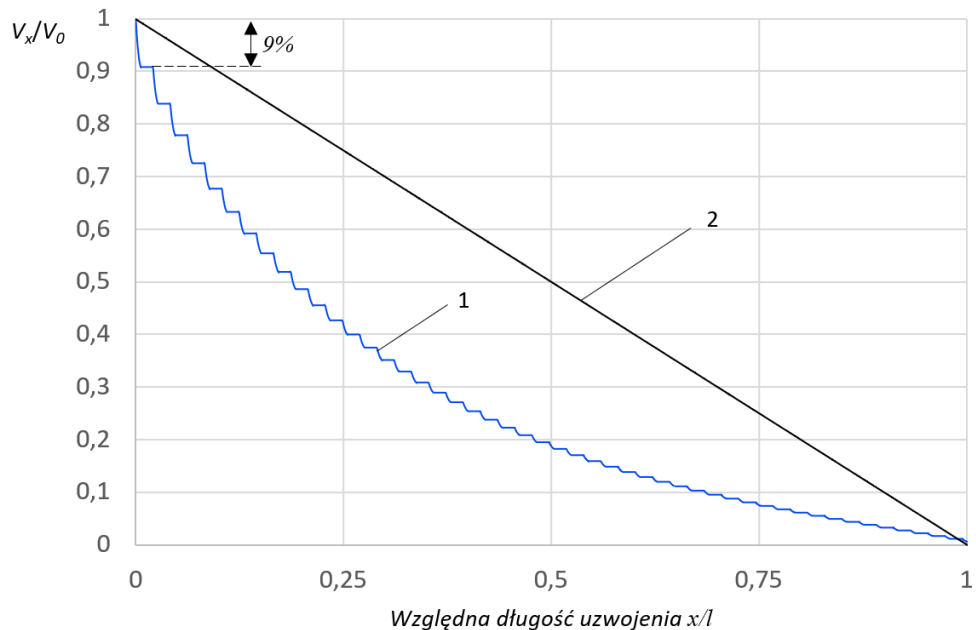


Rys. 8.24 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z przeplotami van Nuysa

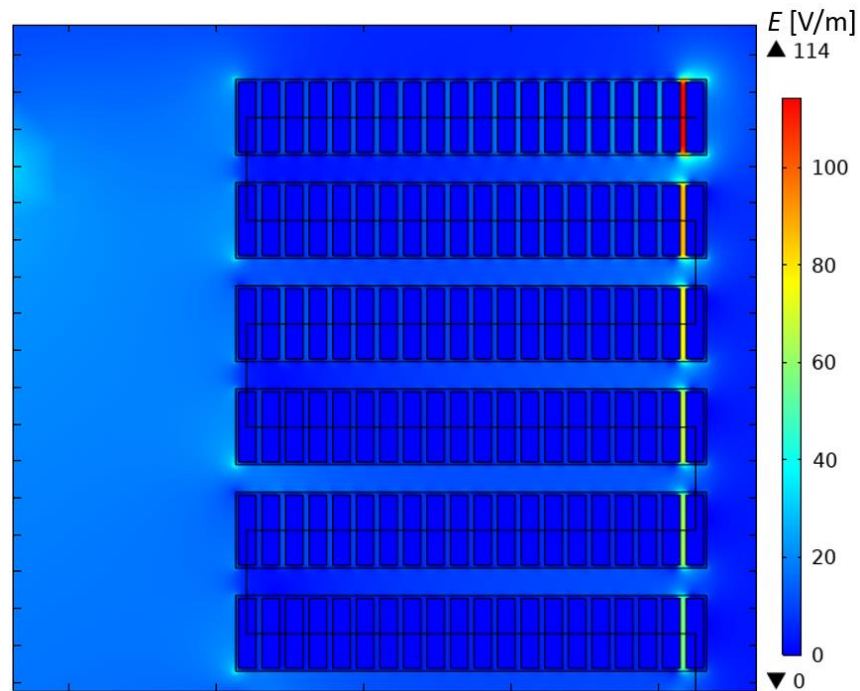
Na Rys. 8.24 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu i szczególnie w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Wyraźnie zarysowane są różnice w rozkładach potencjału panujących w różnych obszarach uzwojenia. Najciekawszy rozkład można zaobserwować w górnym fragmencie uzwojenia – w obrębie pierwszych sześciu cewek. Charakteryzuje się on największymi gradientami potencjału, szczególnie w pobliżu zasilanego zwoju. Potencjał w dolnej części uzwojenia jest bliski potencjałowi ziemi, a potencjały zwojów znajdujących się w środkowym obszarze uzwojenia niewiele odbiegają od potencjału ziemi (około 10-20% wartości  $V_0$ ). Gradienty potencjału panujące w środkowej i dolnej części uzwojenia są niewielkie.

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż zewnętrznej krawędzi uzwojenia (wzdłuż linii A na Rys. 8.24) ma charakter pojemnościowy i jest nieliniowy (Rys. 8.25), ale w znacznie mniejszym stopniu niż w uzwojeniu wywrotkowym, dzięki czemu przebiegi wyrównawcze będą osiągały mniejsze wartości maksymalne. Pomiedzy pierwszymi dwoma cewkami, maksymalny spadek wartości potencjału elektrostatycznego wynosi tylko 9% wartości potencjału wymuszającego  $V_0$  i jest najmniejszy z wszystkich wcześniej analizowanych rodzajów przeplotów oraz znacząco mniejszy, niż w przypadku uzwojenia wywrotkowego. Pomiedzy kolejnymi cewkami, gradienty potencjału maleją wraz z oddalaniem się od cewki pierwszej. W środkowej i dolnej części uzwojenia, gradienty potencjału są niewielkie, dzięki czemu naprężenia elektryczne pomiedzy cewkami osiągają nieduże wartości

Największe naprężenia elektryczne w uzwojeniu, panują w przestrzeni międzyzwojowej pierwszej cewki (Rys. 8.26), pomiędzy dwoma sąsiadującymi zewnętrznymi zwojami. Wynika to bezpośrednio z przeplatania zwojów - geometryczne zbliżenie zwojów, znacznie oddalonych od siebie elektrycznie. W kolejnych cewkach, naprężenia maleją zbliżając się do uziemionego końca uzwojenia. W początkowych cewkach może zachodzić konieczność zastosowania grubszej izolacji, natomiast w środkowej i dolnej części uzwojenia naprężenia są niewielkie.

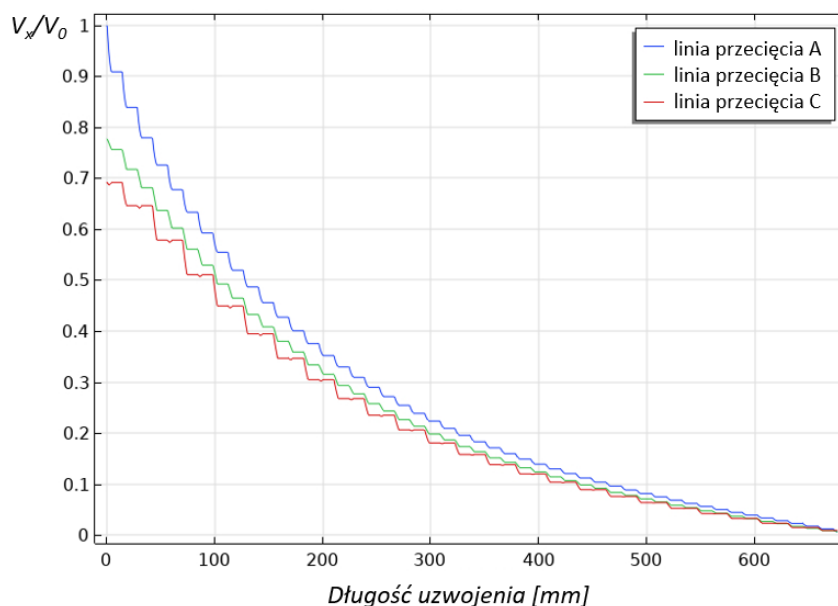


Rys. 8.25 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego z przeplotami van Nuysa (linia A na Rys. 8.24); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia



Rys. 8.26 Rozkład natężenia pola elektrycznego w obrębie sześciu wstępnych cewek uzwojenia z przeplotami van Nuysa

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech pionowych linii przecięć (A, B, C – Rys. 8.24) przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, zewnętrznej i środka uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.27. Podobnie jak w przypadku uzwojenia wywrotkowego, poszczególne rozkłady mają pojemnościowy charakter, ale ich stromości się różnią w zależności od lokalizacji w uzwojeniu – największe stromości występują na zewnętrznej (linia A), a najmniejsze na wewnętrznej stronie uzwojenia (linia C). Mniejsza stromość rozkładu potencjału od strony wewnętrznej uzwojenia, wynika z bliskości uziemionego uzwojenia dolnego napięcia.



Rys. 8.27 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym z przeplotami van Nuysa wzdłuż linii A, B i C (Rys. 8.24)

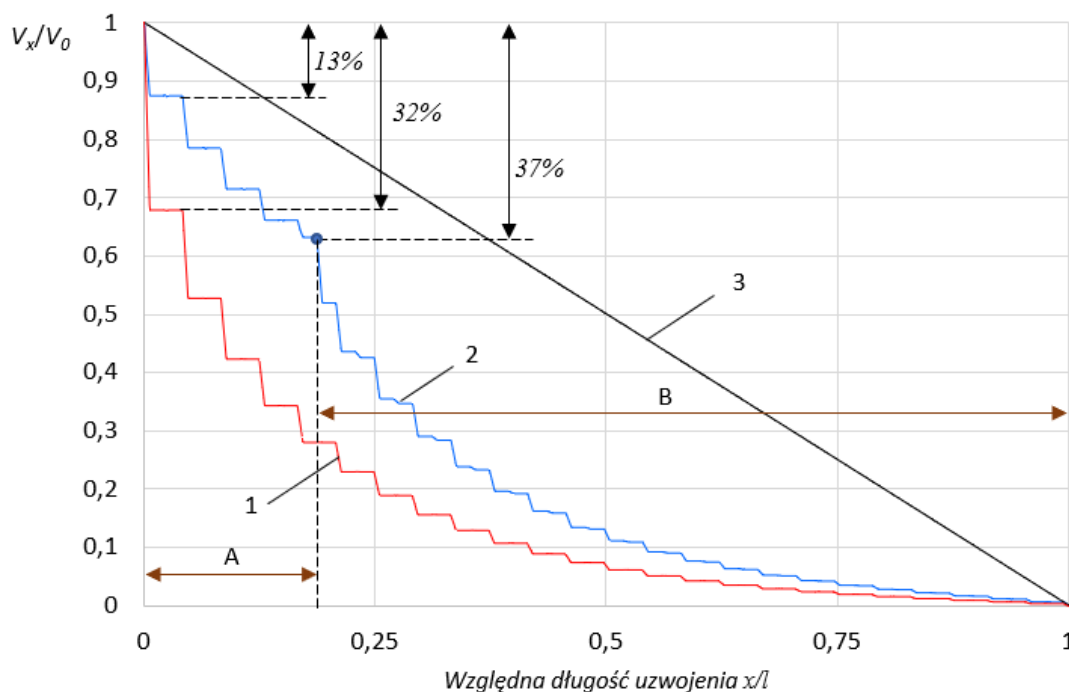
Podobnie jak w przypadku przepleceń analizowanych w poprzednich podrozdziałach, początkowy fragment uzwojenia (górne cewki) jest krytyczny pod względem zagrożeń izolacji od szybkozmiennych przepięć. Dotyczy to szczególnie izolacji międzyzwojowej pierwszej cewki. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części uzwojenia, w przypadku stosowania tego typu konstrukcji.

### 8.3.6 Uzwojenie cewkowe splatane częściowo

W praktyce bardzo często stosowane są uzwojenia, w których splatanie zwojów obejmuje tylko najbardziej zagrożony, początkowy fragment uzwojenia. Pozostała część uzwojenia jest wykonywana wtedy jako klasyczne uzwojenie wywrotkowe. Takie rozwiązanie pozwala na przyspieszenie procesu produkcji oraz obniżenie kosztów wykonania uzwojenia, przy jednoczesnym ograniczeniu narażeń przepięciowych początkowego fragmentu uzwojenia.

W celu zbadania wpływu częściowego splatania zwojów na rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu przeprowadzono symulację, w której przeploty obejmowały tylko początkowe 20% cewek uzwojenia, licząc od zacisku liniowego. Na potrzeby analizy wykorzystano przeplatanie metodą Kratochwila. W analizie wykorzystano analogiczne

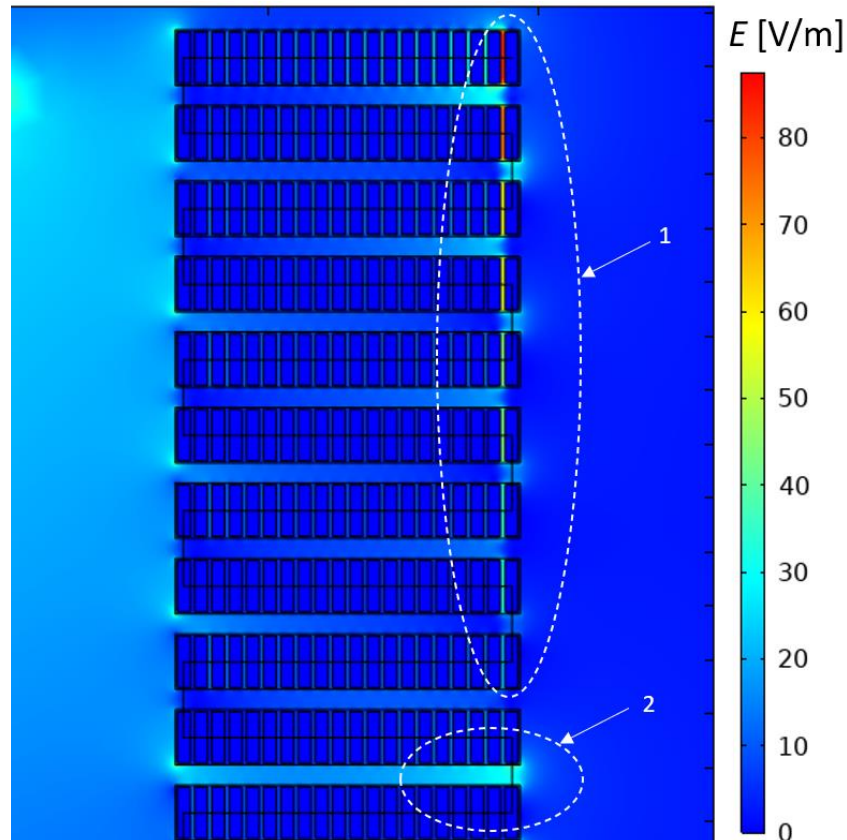
warunki brzegowe i parametry materiałowe jak w rozdziale 8.3.4 dla części splatanej oraz jak w rozdziale 8.3.2 dla części nieobjętej przeplotami. Wpływ zastosowania częściowego splatania zwojów w uzwojeniu przedstawiono na Rys. 8.28 na przykładzie rozkładu potencjału elektrostatycznego  $V$  wzdłuż uzwojenia, na tle rozkładu dla uzwojenia wywrotkowego (analizowanego w rozdziale 8.3.2) oraz rozkładu końcowego.



Rys. 8.28 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu: 1- wywrotkowym, 2 - częściowo splatany (strefa A – część z przeplotami Kratochwila, strefa B – część niesplataną), 3 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Na przedstawionych wykresach wyraźnie widać, że objęcie początkowych 20% cewek uzwojenia przeplotami Kratochwila (strefa A na Rys. 8.28) spowodowało zbliżenie rozkładu początkowego potencjału elektrostatycznego do liniowego rozkładu końcowego. W miejscu przejścia części splatanej uzwojenia (strefa A) do części nieobjętej przeplotami (strefa B) następuje gwałtowne załamanie linii rozkładu potencjału, który w strefie B jest znacznie bardziej nieliniowy i oddala się od rozkładu końcowego. Niemniej jednak, gradient potencjału na początku uzwojenia oraz w obszarze przejścia z części splatanej do niesplatannej jest znacznie mniejszy niż w przypadku uzwojenia wywrotkowego (Rys. 8.28).

Na Rys. 8.29 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego w części uzwojenia objętej przeplotami oraz w miejscu przejścia do strefy niesplatannej. Analizując przedstawiony rozkład natężenia pola elektrycznego w początkowym fragmencie uzwojenia częściowo splatanego można zauważyć charakterystyczne dla uzwojeń splatanych naprężanie izolacji zwojowej (w obszarze 1) oraz charakterystyczne dla uzwojeń niesplatanych naprężanie izolacji pomiędzy skrajnymi zwojami w kolejnych cewkach (w obszarze 2 – izolacja międzycewkowa). Warto zwrócić uwagę, że pomimo przeniesienia większych naprężeń międzycewkowych w głąb uzwojenia, ich wartości maksymalne są znacznie mniejsze niż w przypadku uzwojenia niesplatanego (wywrotkowego – rozdział 8.3.2).



Rys. 8.29 Rozkład natężenia pola elektrycznego w początkowym obszarze uzwojenia częściowo splatanego (20% uzwojenia): 1 – obszar, w którym najbardziej naprężana jest izolacja międzyzwojowa (strefa splatana), 2 – obszar, w którym najbardziej naprężana jest izolacja międzycewkowa uzwojenia (strefa niesplataną)

Przeprowadzona analiza potwierdza pozytywny wpływ stosowania przeplatania zwojów jedynie w początkowym obszarze uzwojenia (w porównaniu do uzwojenia wywrotkowego) w celu poprawienia rozkładu początkowego oraz ograniczenia naprężeń układu izolacyjnego wokół wstępnych cewek uzwojenia.

### 8.3.7 Uzwojenie cewkowe przeplatane – czterocewki

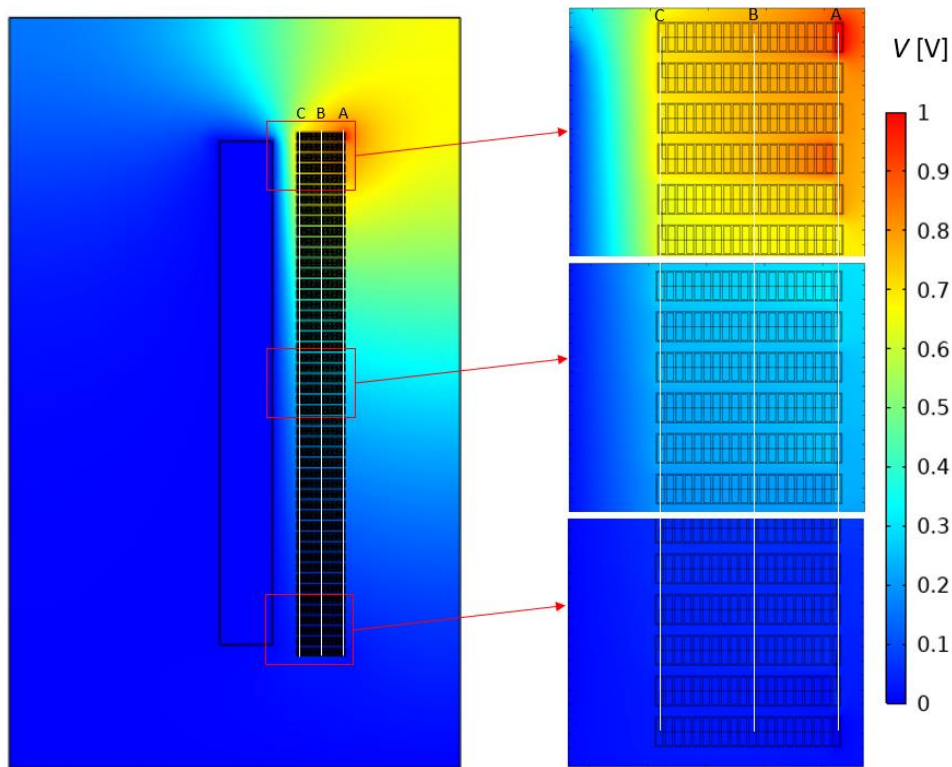
Jak wspomniano w rozdziale 4.1.2, czasami zastosowanie dwucewek splatanych jest niewystarczające do ograniczenia zagrożeń przepięciowych w uzwojeniu do odpowiedniego poziomu. W takich sytuacjach można zastosować tzw. czterocewki splatane. Buduje się je w analogiczny sposób jak dwucewki, ale przeploty obejmują nie dwie, ale cztery kolejne cewki. Dzięki takiemu rozwiązaniu, wzrost pojemności szeregowej uzwojenia jest jeszcze większy, niż przy zastosowaniu dwucewek. Pojemność wzdłużna czterocewek splatanych jest czterokrotnie większa od pojemności dwucewek splatanych, zatem są one skuteczne nawet przy niewielkiej liczbie zwojów w cewce [136].

Analizie poddano uzwojenie cewkowe o jednakowych gabarytach (ta sama całkowita liczba cewek, zwojów oraz wymiary geometryczne), jak w poprzednich przypadkach, ale zbudowane z czterocewek splatanych sposobem Chadwicka-Stearna. W analizie założono, że



pierwszy zewnętrzny zwój pierwszej cewki (licząc od góry) znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, natomiast pierwszy zewnętrzny zwój cewki ostatniej (dolnej) był uziemiony  $V=0$  V (zgodnie z przykładowym schematem przepleceń na Rys. 4.8). Pary zwojów, w których następowało przejście pomiędzy cewkami, znajdowały się na jednakowym pływającym potencjale wynikającym z narzuconych warunków brzegowych i geometrii uzwojenia, zgodnie z zasadą przedstawioną w rozdziale 8.3.1.

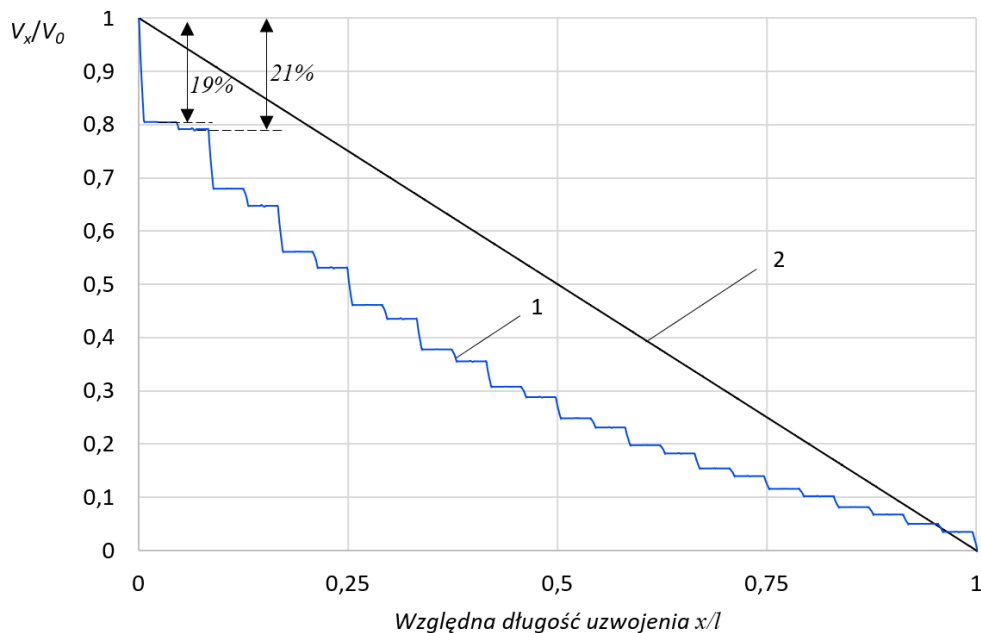
Obliczono rozkład potencjału oraz pola elektrostatycznego w uzwojeniu, a następnie wyznaczono rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przecięć przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od wewnątrz, w środku i na zewnątrz (linie A, B, C – Rys. 8.30).



Rys. 8.30 Rozkład potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z czterocewkami o przeplotach sposobem Chadwicka-Stearna

Na Rys. 8.30 przedstawiono rozkład potencjału elektrostatycznego w całym modelu oraz szczegółowo w górnej, środkowej i dolnej części uzwojenia. Wyraźnie zarysowane są różnice w rozkładach potencjału panujących w różnych obszarach uzwojenia. Najciekawszy rozkład można zaobserwować w górnym fragmencie uzwojenia. Dzięki zastosowaniu czterocewki splatanej, potencjał w cewkach numer 2, 3 i 4 jest na zbliżonym poziomie, a pomiędzy pierwszą a drugą cewką spada maksymalnie o 19%  $V_0$ . Podobne obserwacje dotyczą kolejnych dysków w czterocewkach – pomiędzy pierwszym, a drugim dyskiem następuje większy spadek potencjału, a pomiędzy kolejnymi trzema, różnice są niewielkie. Największe gradienty potencjału można zauważyć pomiędzy pierwszymi dwoma dyskami w kolejnych czterocewkach. W środkowej części uzwojenia potencjał przyjmuje wartości w granicach 15-30% wartości  $V_0$  (Rys. 8.31), a w dolnej części uzwojenia, potencjały są bliskie potencjałowi ziemi. Gradienty potencjału panujące w środkowej i dolnej części uzwojenia są niewielkie.

Przedstawiony na Rys. 8.31 rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia (po zewnętrznej krawędzi – linia A na Rys. 8.30) ma charakter pojemnościowy i jest nieliniowy. Dzięki zwiększonej pojemności szeregowej uzwojenia, nieliniowość tego rozkładu jest mniejsza, niż w przy zastosowaniu dwucewek splatanych oraz uzwojenia wywrotkowego. Dzięki temu, przebiegi wyrównawcze będą osiągały mniejsze wartości maksymalne. Pomiędzy pierwszymi pięcioma cewkami uzwojenia, spadek wartości potencjału elektrostatycznego wynosi tylko 21% wartości potencjału wymuszającego  $V_0$  i jest mniejszy, niż w uzwojeniach złożonych z dwucewek i w uzwojeniu wywrotkowym. Pomiędzy kolejnymi cewkami, gradienty potencjału maleją wraz z oddalaniem się od cewki pierwszej. W środkowej i dolnej części uzwojenia, gradienty potencjału są niewielkie, dzięki czemu naprężenia elektryczne pomiędzy cewkami będą osiągać nieduże wartości.

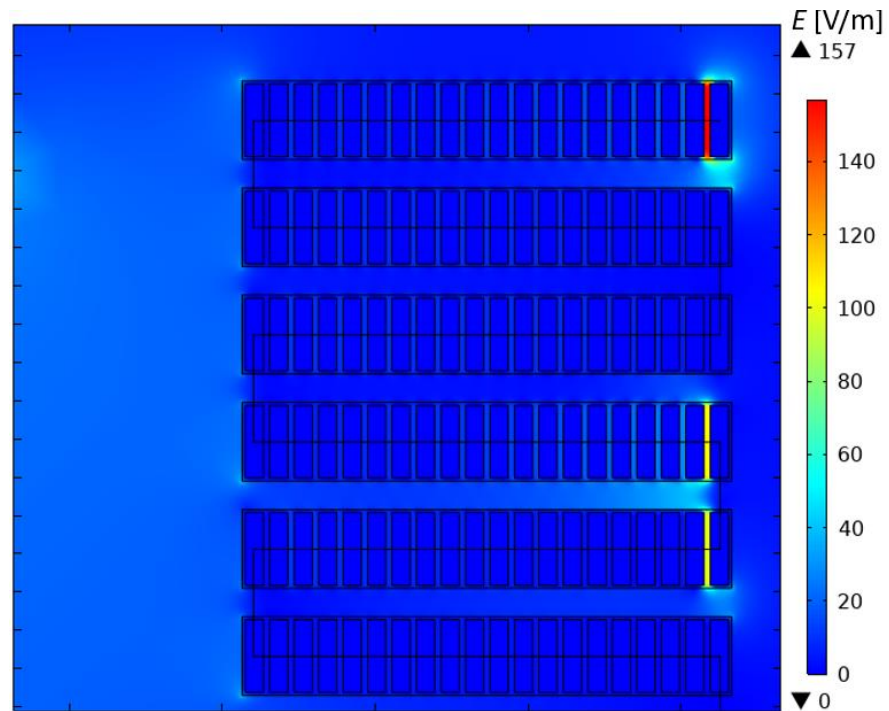


Rys. 8.31 Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia z czterocewkami Chadwicka-Stearna (linia A na Rys. 8.30); 1 – rozkład początkowy, 2 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

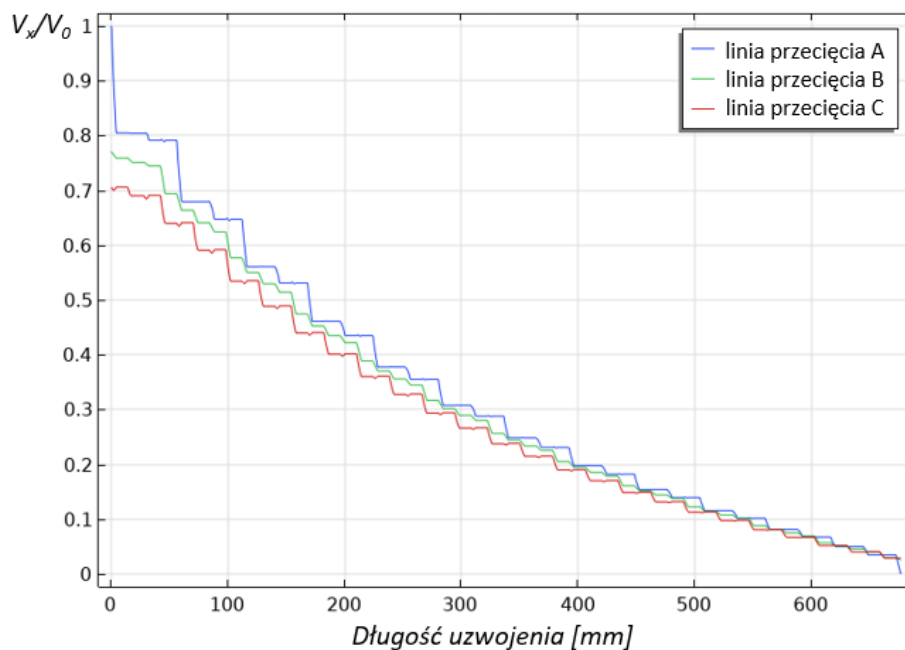
Największe naprężenia elektryczne w uzwojeniu, panują w przestrzeni międzyzwojowej pierwszej cewki (Rys. 8.32), pomiędzy dwoma sąsiadującymi, zewnętrznymi zwojami. Wynika to bezpośrednio z przeplatania zwojów - geometryczne zbliżenie zwojów, znacznie oddalonych od siebie elektrycznie. Dość duże naprężenia panują również pomiędzy skrajnymi zwojami w cewce czwartej (ostatnia cewka pierwszej czterocewki) i piątej (pierwsza cewka drugiej czterocewki) licząc od góry. W kolejnych cewkach, naprężenia maleją w kierunku zbliżania się do uziemionego końca uzwojenia i są niewielkie. W początkowych cewkach może zachodzić konieczność zastosowania grubszej izolacji zwojowej, natomiast w środkowej i dolnej części uzwojenia, naprężenia są niewielkie.

Rozkład potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech pionowych linii przecięć (A, B, C – Rys. 8.30) przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, zewnętrznej i środka uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.33. Podobnie jak w przypadku uzwojenia wywrotkowego oraz uzwojeń zbudowanych z dwucewek splatanych,

poszczególne rozkłady mają pojemnościowy charakter, ale ich stromości różnią się w zależności od lokalizacji w uzwojeniu – największe stromości występują na zewnętrznej (wzdłuż linii A), a najmniejsze na wewnętrznej stronie uzwojenia (linia C). Mniejsza stromość rozkładu potencjału od strony wewnętrznej uzwojenia, wynika z bliskości uzwojenia dolnego napięcia. Można zatem zauważyć, że zewnętrzna część uzwojenia górnego napięcia, jest szczególnie podatna na zagrożenia izolacji od szybkozmiennych przepięć, podobnie jak w poprzednio analizowanych topologiach uzwojenia cewkowego.



Rys. 8.32 Rozkład natężenia pola elektrycznego w obrębie sześciu wstępnych cewek uzwojenia z czterocewkami Chadwicka-Stearna



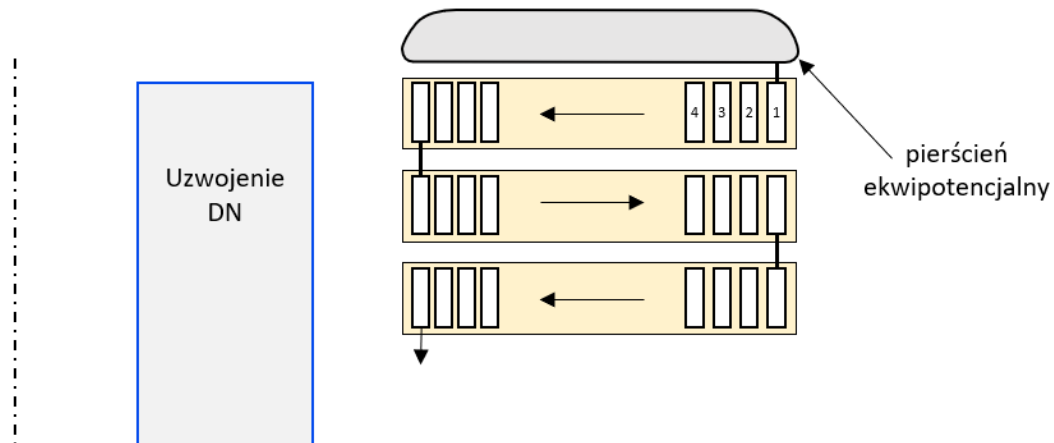
Rys. 8.33 Rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia z czterocewkami Chadwicka-Stearna wzdłuż linii A, B i C (Rys. 8.30)

Podobnie jak w przypadku poprzednich analiz, dotyczących uzwojenia wywrotkowego oraz uzwojeń zbudowanych z dwucewek splatanych, początkowy fragment uzwojenia (górne cewki), jest krytyczny pod względem zagrożeń przepięciowych. Dotyczy to szczególnie izolacji międzyzwojowej pierwszej cewki. Należy zatem szczególną uwagę poświęcić izolacji tej części uzwojenia, w przypadku stosowania tego typu konstrukcji. Niemniej jednak, stromość rozkładu początkowego potencjału jest najmniejsza ze wszystkich analizowanych przypadków, zatem tego typu uzwojenie będzie cechować się większą odpornością na pojawiające się przepięcia szybkozmiennie, niż pozostałe topologie uzwojenia cewkowego.

### **8.3.8 Badanie wpływu pierścieni ekwipotencjalnych**

W transformatorach energetycznych wysokich napięć, w przypadku stosowania uzwojeń cewkowych po stronie wysokiego napięcia, zachodzi konieczność odpowiedniego ukształtowania rozkładu pola elektrycznego w pobliżu krańców uzwojeń GN. Jest to realizowane zazwyczaj przez zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego po stronie zasilanego krańca uzwojenia (często również po obu stronach). Podstawowe zadanie pierścieni ekwipotencjalnych to kształtowanie rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni jarzmowej oraz pomiędzy krańcami sąsiadujących uzwojeń. Kształtowanie to polega na zmniejszeniu natężenia pola elektrycznego przez zmianę rozkładu linii sił pola, wynikających z geometrii uzwojenia – szczególnie jego elementów przewodzących. Dodatkowym zadaniem pierścieni ekwipotencjalnych jest wyrównywanie potencjałów zwojów w pierwszej cewce uzwojenia w czasie oddziaływania przebiegów szybkozmiennych, np. w czasie prób udarowych. Pierścień znajduje się na potencjale równym potencjałowi zacisku wejściowego uzwojenia i jest silnie sprzężony pojemnościowo z pierwszą cewką [95,105].

Szczegółowo przeanalizowano wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego umieszczonego nad górnym krańcem uzwojenia, na zmianę początkowego, pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wywrotkowym oraz zbudowanym z dwucewek splatanych wg sposobu Chadwicka-Stearna. W analizie przyjęto założenia i warunki brzegowe jak w analogicznych przypadkach bez pierścieni ekwipotencjalnych (rozdział 8.3.2 i 8.3.3). Pierścień ekwipotencjalny znajdował się na potencjale  $V_0=1$  V, czyli jednakowym jak potencjał pierwszego zwoju w pierwszej cewce uzwojenia. Szkic geometrii górnego fragmentu uzwojenia wywrotkowego z pierścieniem ekwipotencjalnym przedstawiono na Rys. 8.34. Pierścień znajdował się w odległości 3 mm od pierwszej cewki uzwojenia w każdym z analizowanych przypadków, czyli w takiej samej odległości, jak dystans pomiędzy kolejnymi cewkami uzwojenia.



Rys. 8.34 Górny fragment analizowanego uzwojenia wywrotkowego z pierścieniem ekwipotencjalnym

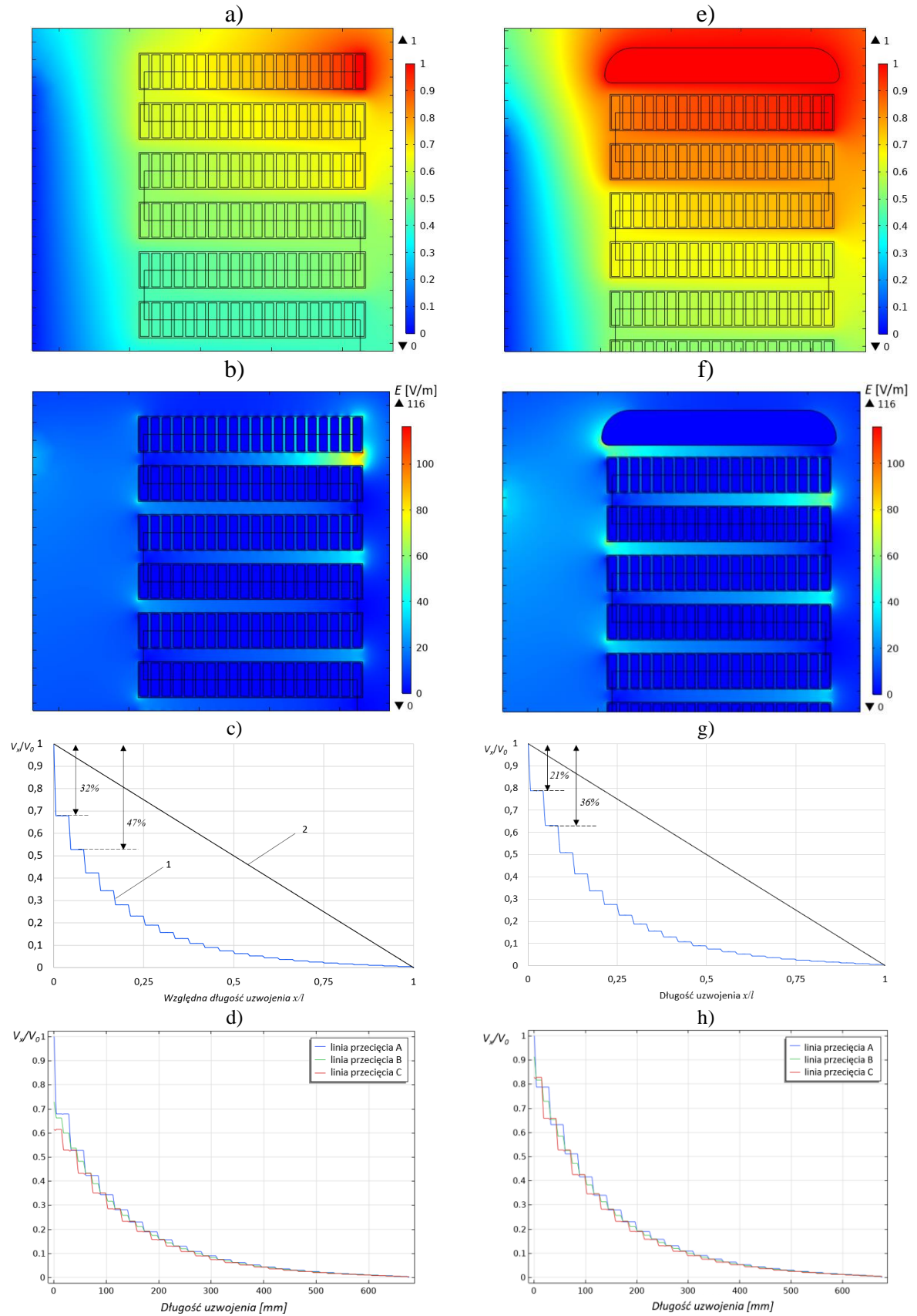
Wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na zmianę rozkładów potencjału elektrostatycznego oraz naprężeń elektrycznych w uzwojeniu wywrotkowym przedstawiono na Rys. 8.35 – przedstawiono kolejno:

- rozkład potencjału elektrostatycznego w obszarze wstępnych cewek uzwojenia - a), e);
- rozkład natężenia pola elektrycznego w obszarze wstępnych cewek uzwojenia - b), f)
- rozkład początkowy potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia (po zewnętrznej krawędzi – linia A na Rys. 8.12) - c), g);
- porównanie rozkładów potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przecięć przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, w środku oraz od zewnątrz (linie A, B, C na Rys. 8.12) - d), h).

Zestawiając rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu wywrotkowym z pierścieniem ekwipotencjalnym i bez niego, można zauważyć, że pierścień spowodował wyrównanie się potencjałów zwojów w pierwszej cewce uzwojenia, co doprowadziło do wyrównania potencjałów zwojów w kolejnych cewkach. Potencjał skrajnego wewnętrznego zwoju pierwszej (i drugiej) cewki, po zastosowaniu pierścienia ekwipotencjalnego wzrósł z 0,62 V do 0,83 V, a skrajnego zwoju drugiej cewki od zewnątrz z 0,68 V do 0,79 V. Wyrównanie potencjałów zwojów w obrębie pierwszej cewki spowodowało wzrost naprężeń elektrycznych pomiędzy uzwojeniem DN i GN, ze względu na zwiększenie potencjałów zwojów znajdujących się po stronie średnicy wewnętrznej uzwojenia – w połowie odległości pomiędzy uzwojeniem GN i DN na wysokości drugiej cewki uzwojenia, natężenie pola wzrosło z 18 V/m do 24 V/m (dla  $V_0=1$  V). Należy zwrócić uwagę, że po zastosowaniu pierścienia, pojawiły się większe naprężenia międzycewkowe od strony wewnętrznej średnicy uzwojenia, ale są one mniejsze niż od strony średnicy zewnętrznej. Maksymalne i średnie naprężenia elektryczne pomiędzy skrajnymi zewnętrznymi zwojami pierwszej i drugiej cewki uzwojenia, po zastosowaniu pierścienia, zmniejszyły się odpowiednio z poziomu 93 V/m do 59 V/m oraz z 78 V/m do 52 V/m, co jest znaczącą poprawą. Podane wartości natężenia pola elektrycznego odnoszą się do jednostkowego potencjału wymuszającego ( $V_0=1$  V). Skutkiem zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu jest również zmniejszenie maksymalnych naprężeń międzyzwojowych w pierwszej cewce uzwojenia (z 54 V/m do 20 V/m).

Uzwojenie wywrotkowe

Uzwojenie wywrotkowe z pierścieniem ekwipotencjalnym



Rys. 8.35 Wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu wywrotkowym

Zastosowanie pierścienia spowodowało zmniejszenie nieliniowości pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia – w obrębie pierwszych pięciu cewek potencjał obniżył się do wartości  $V_x=0,53$  V bez pierścienia oraz do wartości 0,64 V po zastosowaniu pierścienia. Warto zauważyć, że rozkłady potencjału wzdłuż uzwojenia od wewnątrz, w środku i od zewnątrz (wzdłuż linii przecięć *A, B, C* z Rys. 8.12) po zastosowaniu pierścienia są do siebie zbliżone, podczas gdy bez pierścienia różniły się (szczególnie w obszarze początkowych cewek) i powodowały nierównomierny rozkład naprężeń w uzwojeniu.

Analogiczne wnioski jak w przypadku zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu wywrotkowym, można wyciągnąć analizując wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu zbudowanym z dwucewek z przepłotami Chadwicka-Stearna. Zestawienie rozkładów potencjału elektrostatycznego oraz natężenia pola elektrycznego w uzwojeniu splatnym bez pierścienia i z pierścieniem przedstawiono na Rys. 8.36:

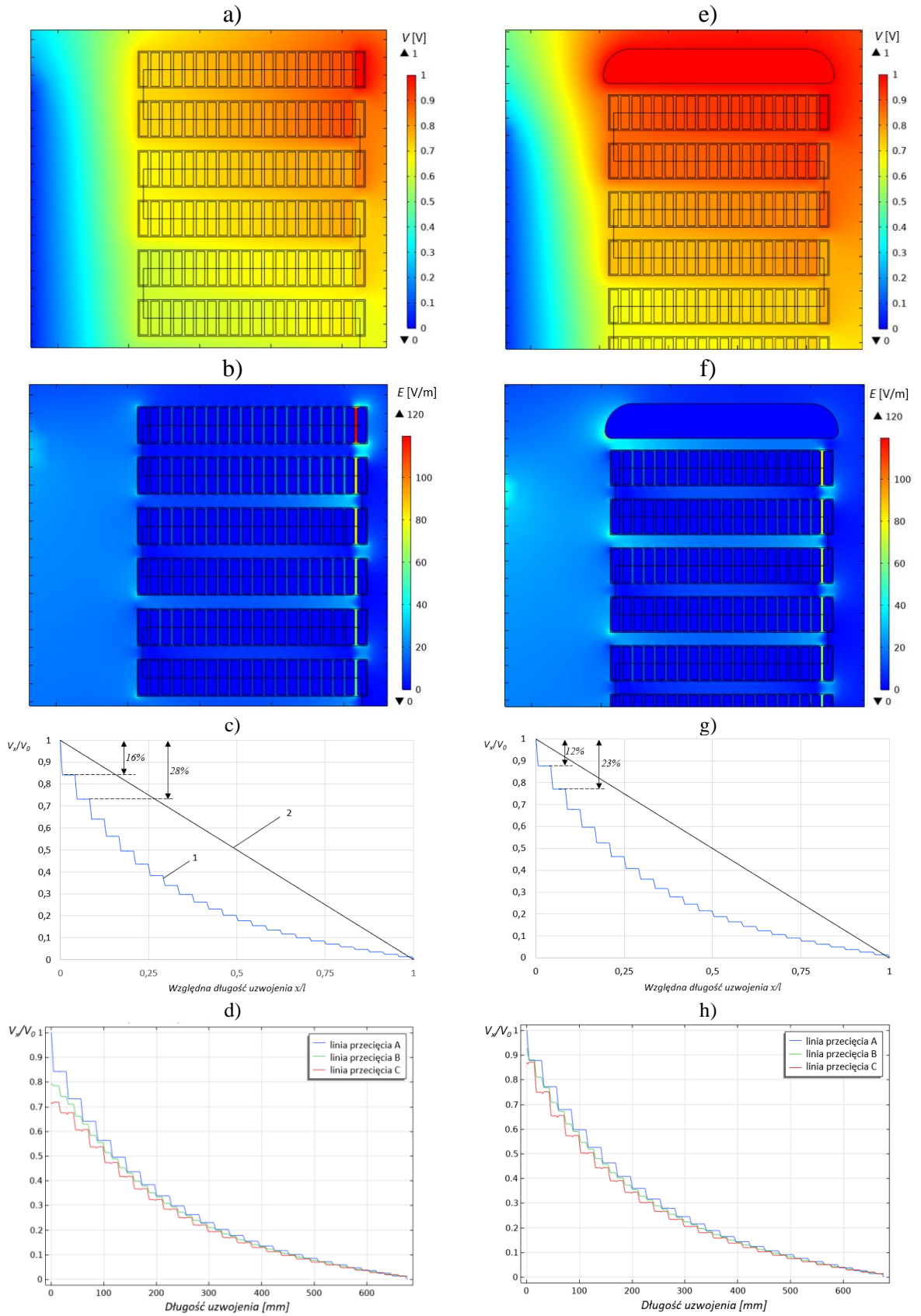
- rozkład potencjału elektrostatycznego w obszarze wstępnych cewek uzwojenia: a), e);
- rozkład natężenia pola elektrycznego w obszarze wstępnych cewek uzwojenia: b), f);
- rozkład początkowy potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia (po zewnętrznej krawędzi – linia *A* na Rys. 8.16) - c), g);
- porównanie rozkładów potencjału elektrostatycznego wzdłuż trzech linii przecięć przechodzących przez wszystkie cewki uzwojenia od strony średnicy wewnętrznej, w środku oraz od zewnątrz (linie *A, B, C* na Rys. 8.16) - d), h).

Zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu zbudowanym dwucewek splatanych sposobem Chadwicka-Stearna spowodowało:

- wyrównanie potencjałów zwojów w pierwszej cewce uzwojenia, co wywołało analogiczny efekt w kolejnych cewkach,
- wzrost potencjału skrajnego wewnętrznego zwoju pierwszej cewki z 0,72 V do 0,87 V, a skrajnego zwoju drugiej cewki od zewnątrz z 0,84 V do 0,88 V,
- wzrost naprężeń elektrycznych pomiędzy uzwojeniem DN i GN – w połowie odległości pomiędzy uzwojeniami, na wysokości drugiej cewki, natężenie pola elektrycznego wzrosło z 21 V/m do poziomu 25 V/m po zastosowaniu pierścienia,
- zmniejszenie maksymalnych i średnich wartości natężenia pola elektrycznego w przestrzeni pomiędzy skrajnymi zewnętrznymi zwojami pierwszej i drugiej cewki odpowiednio z 52 V/m do 35 V/m oraz z 36 V/m do 27 V/m (przy wymuszeniu jednostkowym potencjałem  $V_0$ ),
- zmniejszenie maksymalnych naprężeń międzyzwojowych w pierwszej cewce uzwojenia z 119 V/m na 82 V/m,
- zmniejszenie nieliniowości pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia – potencjał elektrostatyczny w obrębie pierwszych pięciu cewek uzwojenia, po zastosowaniu pierścienia spada do wartości  $V_x=0,77$  V, zamiast do 0,72 V (bez pierścienia),
- wyrównanie rozkładów potencjału wzdłuż uzwojenia od strony wewnętrznej, w środku i od zewnątrz (wzdłuż linii przecięć *A, B, C* z Rys. 8.16).

### Uzwojenie Chadwicka-Stearna

### Uzwojenie Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym



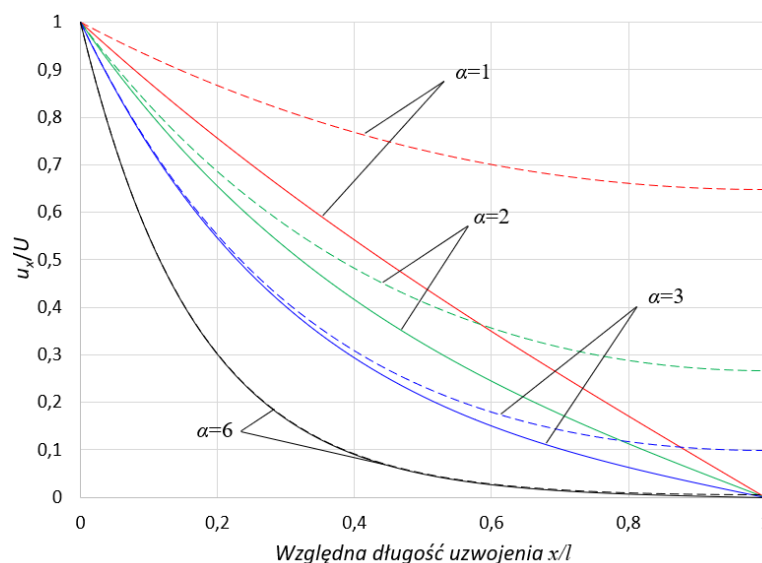
Rys. 8.36 Wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu Chadwicka-Stearna



Przeprowadzona analiza uwidoczniała pozytywny wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na poprawienie początkowego rozkładu potencjału w uzwojeniu. W analizowanym przypadku, nie uwzględniono uziemionego jarzma rdzenia, które wprowadza dodatkową pojemność doziemną w wycinkach uzwojenia znajdujących się bezpośrednio pod nim. W takim przypadku, pozytywna rola pierścienia byłaby jeszcze bardziej wyraźna. Można wyciągnąć wniosek, że pierścienie ekwipotencjalne w uzwojeniu cewkowym, spełniają podobną rolę, jak ekrany elektrostatyczne w uzwojeniu wielowarstwowym. Górny pierścień ekwipotencjalny w uzwojeniu cewkowym przejmuje sprzężenie pojemnościowe do uziemionych elementów transformatora (jarzma rdzenia), podobnie jak wewnętrzny ekran elektrostatyczny w uzwojeniu warstwowym, przejmuje sprzężenie pojemnościowe do uziemionego uzwojenia DN. Dodatkowo oba elementy wyrównują potencjały zwojów w pierwszej cewce lub warstwie uzwojenia, co z kolei przekłada się na bardziej równomierny rozkład potencjału w kolejnych cewkach lub warstwach. Zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego w innych topologiach uzwojeń spowoduje analogiczne skutki i poprawi ich zachowanie w początkowej chwili oddziaływania szybkozmiennego napięcia udarowego.

### 8.3.9 Uzwojenie z końcem izolowanym

W rozdziale 5 przedstawiono zależności pozwalające na analityczne wyznaczenie rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu z końcem uziemionym (5.21) oraz izolowanym od ziemi (5.22). Rozkłady te są zależne od parametru  $\alpha$ . Na Rys. 8.37 przedstawiono zestawienie rozkładów dla uzwojenia z uziemionym i izolowanym końcem dla różnych wartości parametru  $\alpha$ . Porównując te rozkłady dla obu konfiguracji uzwojenia można zauważyć, że dla  $\alpha < 3$  rozkłady się różnią, natomiast dla  $\alpha > 3$  rozkłady są praktycznie identyczne. Charakterystyczną cechą rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu z końcem izolowanym dla  $\alpha \leq 3$  jest nieopadanie krzywej rozkładu początkowego do 0 w pobliżu końca uzwojenia.

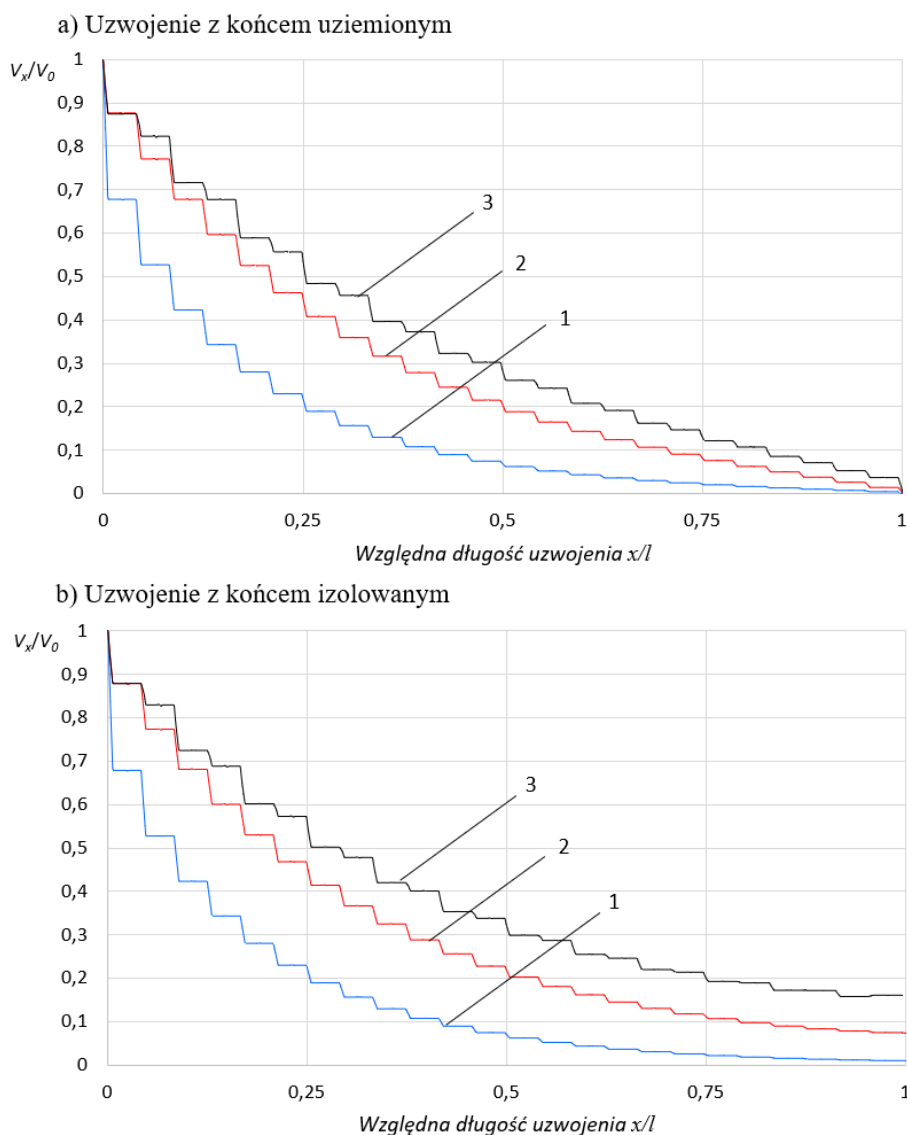


Rys. 8.37 Początkowe rozkłady napięcia w uzwojeniu z końcem uziemionym (linia ciągła) oraz izolowanym (linia przerywana) dla różnych wartości parametru  $\alpha$  wyznaczone z zależności (5.21) i (5.22)

Analogiczną analizę przeprowadzono metodą połową, zgodnie z metodologią przedstawioną w 8.3.1 dla topologii uzwojeń o różnych wartościach parametru  $\alpha$ :

- uzwojenie wywrotkowe ( $\alpha=7,8$ ),
- uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna i pierścieniem ekwipotencjalnym ( $\alpha=3,4$ ),
- uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna i pierścieniem ekwipotencjalnym ( $\alpha=2,4$ ).

W przeprowadzonych symulacjach ostatni zwój uzwojenia (w skrajnej dolnej cewce) znajdował się na pływającym potencjale (*Floating potential*). Uziemionymi elementami były jedynie: uzwojenie DN oraz powierzchnia podłogi laboratorium. Otrzymane symulacyjnie rozkłady początkowe przy uziemionym i izolowanym od ziemi końcu uzwojenia przedstawiono na Rys. 8.38.



Rys. 8.38 Początkowe rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach z końcem uziemionym (a) oraz izolowanym (b): 1 – uzwojenie wywrotkowe ( $\alpha=7,8$ ), 2 – uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym ( $\alpha=3,4$ ), 3 – uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym ( $\alpha=2,4$ );  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Na przedstawionym na Rys. 8.38 porównaniu rozkładów początkowych dla uzwojeń o różnym współczynniku  $\alpha$  przy uziemieniu oraz izolowaniu końca uzwojenia można zaobserwować te same cechy rozkładów jak otrzymane metodą analityczną (Rys. 8.37). Można zatem stwierdzić, że zastosowana metodologia obliczeń nadaje się do wyznaczania początkowych rozkładów w uzwojeniach z końcem uziemionym oraz izolowanym od ziemi. Jak można zauważyć na Rys. 8.38, w przypadku dużej wartości  $\alpha$  (uzwojenie wywrotkowe), uziemienie końca uzwojenia nie ma wpływu na początkowy rozkład potencjału elektrostatycznego. W przypadku uzwojenia zbudowanego z dwucewek oraz czterocewek ( $\alpha \approx 3$ ), rozkłady w pobliżu izolowanego końca uzwojenia różnią się od tych otrzymanych dla uzwojeń z końcem uziemionym. Dla uzwojenia zbudowanego z dwucewek potencjały ostatnich zwojów osiągają wartości na poziomie  $8\%V_0$ , a dla uzwojenia z czterocewek ok.  $16\%V_0$ .

## 8.4 Dyskusja wyników

W rozdziale 8 przedstawiono wyniki analizy badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych narażeń przepięciowych w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego. Analiza wyników badań eksperymentalnych miała na celu porównanie rozkładów przepięć oraz rozkładów pseudo-początkowych napięcia w uzwojeniu poddanym działaniu udaru napięciowego o dwóch różnych kształtach, natomiast celem analizy wyników symulacji, było zbadanie wpływu zastosowania różnych metod przeplatania zwojów oraz pierścienia ekwipotencjalnego na poprawę początkowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia. Przeanalizowano również rozkłady potencjału w uzwojeniu częściowo splatnym oraz w uzwojeniu z końcem izolowanym od ziemi.

Obiektem analizy był model pary uzwojeń jednej fazy transformatora o mocy 25 MVA, o uzwojeniu cewkowym wysokiego napięcia i uzwojeniu warstwowym po stronie dolnego napięcia. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników rejestracji przebiegów przepięć doziemnych w uzwojeniu poddanym oddziaływaniu udaru prostokątnego oraz znormalizowanego udaru piorunowego  $1,2/50 \mu\text{s}$ . Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia badań na rzeczywistym obiekcie, do analizy wykorzystano wyniki badań pochodzące z pracy doktorskiej dr. inż. Piotra Pająka (Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie). Udary były wytwarzane za pomocą niskonapięciowego generatora funkcji o napięciu  $20 V_{pp}$  oraz za pomocą jednostopniowego generatora napięć udarowych piorunowych, o napięciu 300 V. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów przepięć w różnych miejscach uzwojenia, wyznaczono pseudo-początkowe rozkłady napięcia oraz rozkłady maksymalnych wartości przepięć w uzwojeniu. Następnie analiza została rozszerzona o część obliczeniową, mającą na celu wyznaczenie rozkładów początkowych potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu w zależności od zastosowania różnych topologii przeplatania zwojów w uzwojeniu oraz po zastosowaniu pierścienia ekwipotencjalnego. Podobnie jak w przypadku analizy symulacyjnej dla uzwojenia wielowarstwowego (rozdział 7.3), należy pamiętać, że rozkłady potencjału elektrostatycznego są rozkładami teoretycznymi, jakie wystąpiłyby w uzwojeniu w przypadku udaru o nieskończonej stromości czoła. W praktyce takie udary nie występują oraz zachodzi

tłumienie przebiegów przepięciowych, dlatego otrzymane symulacyjnie rozkłady stanowią granicę do jakiej dążyłyby chwilowe rozkłady napięcia przy ciągłym zwiększaniu stromości udaru. Z tego względu, analiza ta powinna być traktowana jako metoda mająca na celu wstępną ocenę skuteczności wprowadzanych zmian konstrukcyjnych na zmniejszenie narażeń przepięciowych izolacji uzwojenia i ocenę słuszności obranego kierunku rozwoju transformatora. Wyniki takich analiz powinny być weryfikowane eksperymentalnie. Analiza symulacyjna może być również pomocna w obliczaniu naprężeń elektrycznych w izolacji i wyznaczaniu krytycznych obszarów w uzwojeniu z punktu widzenia wytrzymałości izolacji.

Przeprowadzone analizy wyników badań eksperymentalnych i symulacji pozwoliły na porównanie narażeń przepięciowych uzwojenia, pochodzących od udarów o różnych kształtach oraz określenie wpływu zastosowania przeplatania zwojów i zastosowania pierścieni ekwipotencjalnych na poprawę początkowego rozkładu potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu. Na podstawie analizy, wyciągnięto istotne wnioski dotyczące wpływu kształtu i stromości napięcia udarowego na przebiegi napięcia wewnątrz uzwojenia oraz określono wpływ zastosowania przeplotów i pierścieni ekwipotencjalnych na kształtowanie narażeń izolacji w uzwojeniu o budowie cewkowej.

Na podstawie otrzymanych eksperymentalnie danych stwierdzono, że najbardziej zagrożoną od przepięć częścią uzwojenia, jest obszar pomiędzy 75-100% jego wysokości, a w szczególności obszary, w których występują wysokoczęstotliwościowe oscylacje o amplitudzie przekraczającej wartości wynikające z liniowego rozkładu napięcia. Analizy rozkładów przepięć przy wymuszeniu udarem prostokątnym i znormalizowanym udarem piorunowym 1,2/50  $\mu$ s pozwoliły na wyciągnięcie zbieżnych wniosków. Najważniejsze ogólne wnioski wynikające z analizy przeprowadzonej dla dwóch różnych kształtów udarów napięciowych są następujące:

- przebiegi napięć w głębi uzwojenia różnią się od przebiegu napięcia wymuszającego (prostokątnego i udarowego piorunowego),
- w początkowej fazie oddziaływania udarów w uzwojeniu występują silnie tłumione oscylacje wysokoczęstotliwościowe nałożone na drgania o niższej częstotliwości,
- podstawowa harmoniczna drgań w różnych obszarach uzwojenia ma różną częstotliwość, co może świadczyć o lokalnych obwodach rezonansowych w uzwojeniu,
- w żadnym punkcie uzwojenia przepięcia nie przekraczają wartości maksymalnej udaru doprowadzonego do jego zacisków; w punkcie  $x/l=0,75$  wartość maksymalna przepięcia była zbliżona do wartości maksymalnej przebiegu udarowego (ok. 98%  $U$ ),
- wartości maksymalne przepięć w różnych punktach uzwojenia występują niejednocześnie,
- napięcie w punktach uzwojenia oddalonych od zacisku wejściowego narasta z pewnym opóźnieniem w stosunku do czoła napięcia udarowego,
- rozkład przepięć w uzwojeniu, w początkowej fazie oddziaływania udarów, jest nierównomierny,
- kształt chwilowych rozkładów napięcia wzdłuż uzwojenia zmienia się z czasem oddziaływania udaru – od silnie nieliniowego, aż do osiągnięcia rozkładu liniowego,

- przebiegi oscylacyjne wytlumiają się po czasie ok. 45  $\mu\text{s}$  i wtedy można uznać, że rozkład napięcia w uzwojeniu jest już liniowy.

Porównując rozkłady przepięć przy wymuszeniu udarem prostokątnym i udarem piorunowym można zauważyć ponadto, że częstotliwości oscylacji w punktach uzwojenia o tych samych współrzędnych  $x/l$  są niemal jednakowe i ich lokalne maksima i minima występują praktycznie w tych samych chwilach czasu  $t$ . W trakcie pierwszych 2  $\mu\text{s}$  oddziaływania udarów, wartości maksymalne przepięć w uzwojeniu w obu przypadkach są zbliżone, po czym wartości przepięć przy udarze piorunowym maleją ze względu na opadający grzbiet udaru.

Przeprowadzone analizy potwierdziły, że do skutecznej oceny narażeń przepięciowych w uzwojeniu konieczna jest nie tylko znajomość wartości maksymalnej udaru napięciowego docierającego do zacisków transformatora, ale również znajomość reakcji samego uzwojenia na pojawiające się przepięcie, która to zależy od budowy uzwojenia oraz kształtu napięcia udarowego.

W ramach analizy eksperymentalnej wyznaczono rozkłady pseudo-początkowe napięcia w uzwojeniu cewkowym w początkowej fazie oddziaływania udarów napięciowych o dwóch różnych kształtach. Jednakże, rozkłady te nie odzwierciedlają idealnie narażeń jakim może być poddawane uzwojenie w początkowej chwili po doprowadzeniu fali udarowej. Zgodnie z danymi wejściowymi, uzwojenie poddane analizie, było zbudowane z dwucewek splatanych, ale nie był znany schemat przeplotów. Nie było również możliwości przeprowadzenia jego dogłębnej analizy organoleptycznej, w celu określenia rodzaju przepleceń. Z tego względu analizę eksperymentalną rozszerzono o szczegółową, teoretyczną analizę symulacyjną obejmującą obliczenia pojemnościowych rozkładów potencjału elektrostatycznego w różnych topologiach uzwojenia cewkowego (różne rodzaje przepleceń zwojów w dwucewkach oraz dla uzwojenia bez przeplotów, w celu określenia wpływu przeplatania zwojów). Przeanalizowano również wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego, umieszczonego nad górną krawędzią uzwojenia, na ograniczenie narażeń przepięciowych. Dodatkowo zbadano również rozkłady potencjału w uzwojeniu: częściowo splatany, a także w uzwojeniu zbudowanym z czterocewek splatanych oraz w uzwojeniu z izolowanym końcem. Symulacje numeryczne, pomimo ograniczeń i zastosowania uproszczeń, pozwalają na relatywnie szybką analizę różnic w narażeniach elektrycznych izolacji dla różnych konfiguracji uzwojenia oraz umożliwiły zaobserwowanie charakterystycznych cech rozkładów pojemnościowych wynikających ze specyficznego wpływu sprzężenia pojemnościowego uzwojenia i pierścienia ekwipotencjalnego. W analizach tych przyjęto założenie, że początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu, występujący natychmiast po pojawieniu się fali udarowej, jest czysto pojemnościowy i odpowiada rozkładowi potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu, wynikającego z warunków brzegowych, parametrów zastosowanych materiałów oraz geometrii układu. Biorąc pod uwagę teoretyczny charakter rozkładów czysto pojemnościowych oraz ograniczenia symulacyjne, należy je traktować głównie jakościowo; dane ilościowe są obarczone większym ryzykiem niezgodności, dlatego powinny być analizowane przez doświadczonych osoby oraz weryfikowane eksperymentalnie.

Przeprowadzone symulacje obejmowały:

- wyznaczenie rozkładów pojemnościowych potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojeń o różnej budowie,
- wyznaczenie rozkładów naprężeń elektrycznych w krytycznych obszarach uzwojeń o różnej budowie.

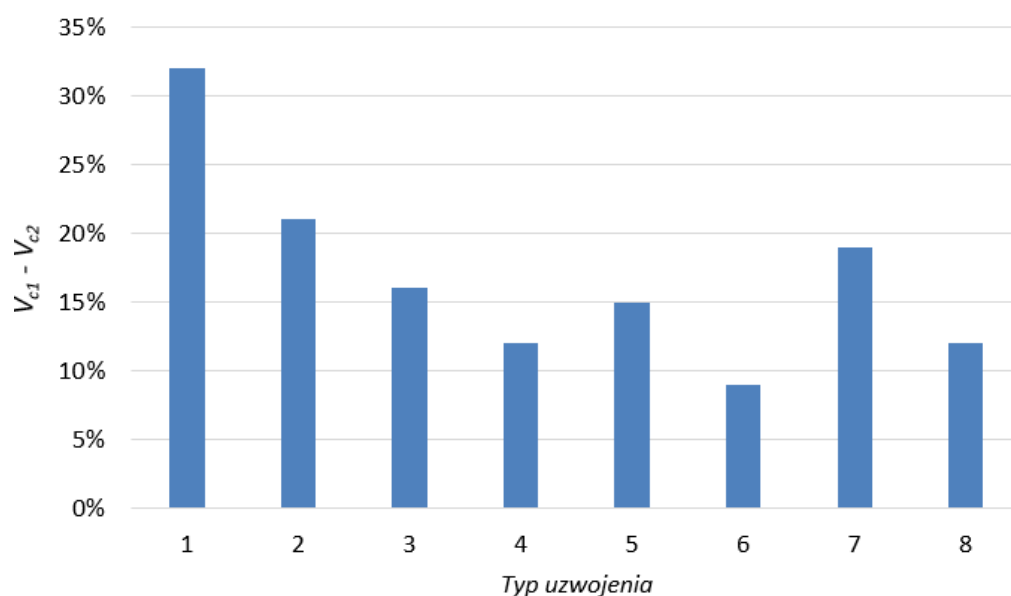
Przeprowadzona została analiza uzwojenia typu wywrotkowego (bez przepleceń) oraz uzwojeń zbudowanych z dwucewek splatanych metodami: Chadwicka-Stearna, Kratochwila i van Nuysa, oraz uzwojenie zbudowane z czterocewek splatanych wg schematu Chadwicka-Stearna. Dla uzwojenia wywrotkowego oraz uzwojenia zbudowanego z dwucewek oraz czterocewek Chadwicka-Stearna przeprowadzono dodatkowo analizę wpływu zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na ograniczenie narażeń przepięciowych. Szczegółowa analiza uzwojenia zbudowanego z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem, nie jest zaprezentowana w pracy – przedstawiony jest jedynie rozkład początkowy (Rys. 8.43).

Przeprowadzone symulacje wykazały, że uzwojenie wywrotkowe (bez przeplotów) cechuje się silnie nieliniowym rozkładem pojemnościowym potencjału elektrostatycznego oraz powstaniem znacznych naprężeń międzycewkowych w pobliżu początku uzwojenia. Zastosowanie przeplatania zwojów (niezależnie od wzoru splatania) powoduje zmniejszenie nieliniowości rozkładu początkowego potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu, przez zwiększenie pojemności szeregowej. Negatywnym efektem zastosowania przeplotów jest zwiększenie naprężeń międzyzwojowych, dlatego należy zwracać uwagę na prawidłowe zaprojektowanie izolacji zwojowej w tego typu konstrukcjach. Naprężenia międzycewkowe w uzwojeniach splatanych są mniejsze, niż w uzwojeniu wywrotkowym. Te wnioski mają zastosowanie dla wszystkich rodzajów przeplotów. Przeplatanie zwojów ma szczególnie istotny wpływ na ograniczenie gradientu potencjału w obrębie wstępnych cewek uzwojenia, które są szczególnie narażane w czasie oddziaływania szybkozmiennych przebiegów przepięciowych. Każdy z zastosowanych rodzajów przeplotów ma swoje wady i zalety w porównaniu do pozostałych. Wynikają one zarówno z aspektów wykonawczych (łatwość wykonania przejścia pomiędzy cewkami i pracochłonność) jak i aspektów elektrycznych. Z punktu widzenia łatwości wykonania, najkorzystniejsze wydaje się uzwojenie z przeplotami Kratochwila, w którym połączenie zwojów w dwucewkach wykonuje się na skrajnych zewnętrznych zwojach uzwojenia.

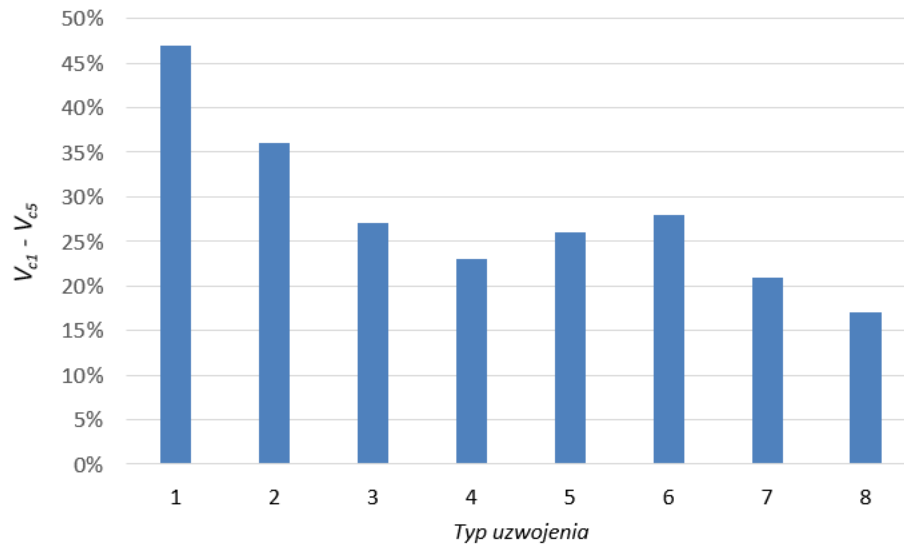
W celu oceny skuteczności ograniczania narażeń przepięciowych dla różnych rodzajów przepleceń, porównano wartości maksymalnej różnicy potencjałów pola elektrostatycznego pomiędzy pierwszymi dwoma oraz pięcioma cewkami uzwojenia (Tabela 8.2). Wartości wyrażono w procentach wartości szczytowej potencjału wymuszającego o wartości  $V_0=1$  V (wartość 1 V została przyjęta na potrzeby obliczeń i może być w sposób liniowy przeskalowana do większych wartości wymuszenia). Graficzne przedstawienie porównania z Tabeli 8.2, przedstawiono na Rys. 8.39 i Rys. 8.40.

Tabela 8.2. Porównanie wartości maksymalnej różnicy potencjałów pola elektrostatycznego pomiędzy cewkami uzwojenia o różnych topologiach

Uzwojenie \ Parametr	Maksymalna różnica potencjału elektrostatycznego pomiędzy cewką 1 i 2 ( $V_{c1} - V_{c2}$ ) [% $V_0$ ]	Maksymalna różnica potencjału elektrostatycznego pomiędzy cewką 1 i 5 ( $V_{c1} - V_{c5}$ ) [% $V_0$ ]
1. Uzwojenie wywrotkowe	32%	47%
2. Uzwojenie wywrotkowe + pierścień ekwipotencjalny	21%	36%
3. Dwucewki Chadwicka-Stearna	16%	28%
4. Dwucewki Chadwicka-Stearna + pierścień ekwipotencjalny	12%	23%
5. Dwucewki Kratochwila	15%	26%
6. Dwucewki van Nuysa	9%	28%
7. Czterocewki Chadwick-Stearn	19%	21%
8. Czterocewki Chadwick-Stearn + pierścień ekwipotencjalny	12%	17%



Rys. 8.39 Graficzne porównanie wartości maksymalnej różnicy potencjałów pola elektrostatycznego pomiędzy pierwszymi dwoma cewkami uzwojenia cewkowego o różnych topologiach (oznaczenia topologii jak w Tabeli 8.2), wyrażone w procentach wartości  $V_0=1\text{ V}$



Rys. 8.40 Graficzne porównanie wartości maksymalnej różnicy potencjałów pola elektrostatycznego pomiędzy pierwszymi pięcioma cewkami uzwojenia cewkowego o różnych topologiach (oznaczenia topologii jak w Tabeli 8.2), wyrażone w procentach wartości  $V_0=1 V$

Na podstawie analizy Tabeli 8.2 oraz Rys. 8.39 i Rys. 8.40 można zauważyć, że najmniejsze napięcia pomiędzy dwoma pierwszymi cewkami występują w uzwojeniu zbudowanym z dwucewek van Nuysa. Analogiczne wartości dla dwucewek Kratochwila i Chadwicka-Stearna są większe i porównywalne. Na przestrzeni pierwszych pięciu cewek, maksymalne różnice potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach zbudowanych z dwucewek są porównywalne już we wszystkich trzech rodzajach przeplotów i wynoszą 26-28%  $V_0$ . Można zatem stwierdzić, że z punktu widzenia przepięć pomiędzy dwoma pierwszymi cewkami najkorzystniejsza jest konstrukcja van Nuysa. Warto zauważyć, że w analizowanej geometrii uzwojenia, zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu wywrotkowym spowodowało znaczącą poprawę rozkładów potencjału w obrębie dwóch początkowych cewek uzwojenia (poprawa o ok. 11%  $V_0$ ), ale nadal były to rozkłady znacznie gorsze niż w przypadku dowolnego uzwojenia przeplatanego bez pierścienia. Dodanie pierścienia ekwipotencjalnego do uzwojenia Chadwicka-Stearna pozwoliło na dalsze ograniczenie różnicy potencjałów pomiędzy wstępnymi cewkami uzwojenia (odpowiednio do poziomów 12%  $V_0$  dla pierwszych dwóch i 23%  $V_0$  dla pierwszych pięciu cewek). Ciekawa obserwacja dotyczy uzwojenia zbudowanego z czterocewek splatanych – maksymalna różnica potencjałów pomiędzy pierwszymi dwoma cewkami wynosi aż 19%  $V_0$  i jest większa niż w przypadku uzwojenia zbudowanego z dwucewek splatanych, natomiast w kolejnych cewkach, aż do piątej włącznie, niewiele się zmienia (zmiana z 19% na 21%  $V_0$ ). Na przestrzeni pierwszych pięciu cewek, maksymalna różnica potencjałów jest nieco mniejsza niż w uzwojeniu Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym. Zastosowanie pierścienia w uzwojeniu zbudowanym z czterocewek spowodowało dalszą, znaczną poprawę rozkładu potencjału w obrębie początkowych dwóch (spadek do 12%  $V_0$ ) oraz pięciu cewek uzwojenia (spadek do 17%  $V_0$ ). Skuteczność stosowania pierścienia ekwipotencjalnego w celu poprawy początkowego rozkładu potencjału została zatem udowodniona we wszystkich przeprowadzonych analizach.

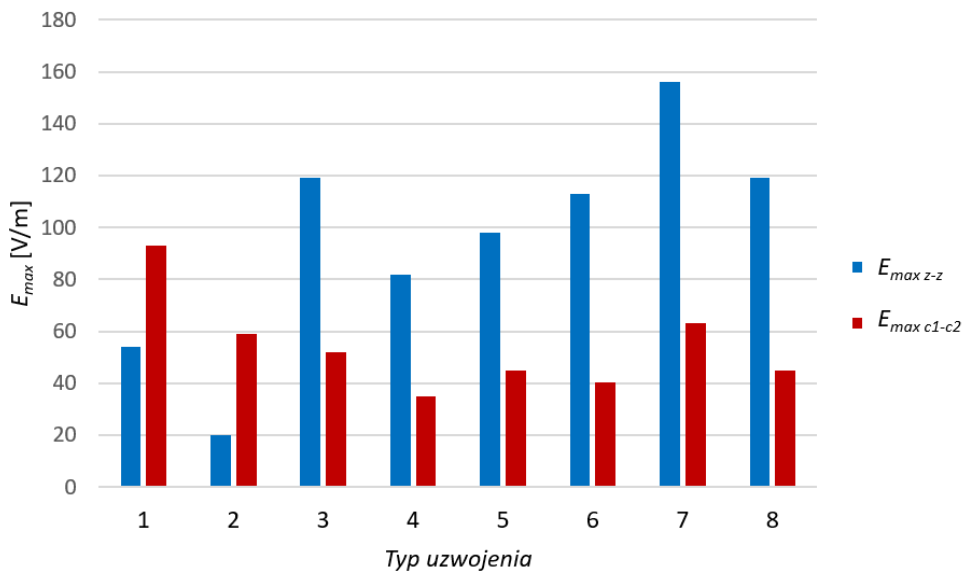
Przeprowadzone symulacje numeryczne wykazały dodatkowo, że zastosowanie przeplatania zwojów w uzwojeniu spowodowało ograniczenie napiężeń międzycewkowych



i wzrost naprężeń międzyzwojowych. Wynika to bezpośrednio z geometrycznego zbliżenia do siebie zwojów, które według elektrycznej kolejności nawijania, są od siebie znacznie oddalone (nawet o kilkanaście zwojów), co skutkuje zgromadzeniem znacznie większych energii w przestrzeniach międzyzwojowych i zwiększeniem wypadkowej pojemności szeregowej uzwojenia. Porównanie maksymalnych wartości naprężeń międzyzwojowych  $E_{max\ z-z}$  oraz międzycewkowych  $E_{max\ c1-c2}$  w poszczególnych przypadkach przedstawiono w tabeli 8.3 oraz graficznie na Rys. 8.41.

Tabela 8.3. Porównanie maksymalnych wartości naprężeń międzyzwojowych  $E_{max\ z-z}$  oraz międzycewkowych  $E_{max\ c1-c2}$  dla wymuszenia potencjałem  $V_0=1\ V$

Uzwojenie	Parametr	$E_{max\ z-z}$ [V/m]	$E_{max\ c1-c2}$ [V/m]
1. Uzwojenie wywrotkowe		54	93
2. Uzwojenie wywrotkowe + pierścień ekwipotencjalny		20	59
3. Dwucewki Chadwicka-Stearna		119	52
4. Dwucewki Chadwicka-Stearna + pierścień ekwipotencjalny		82	35
5. Dwucewki Kratochwila		98	45
6. Dwucewki van Nuysa		113	41
7. Czterocewki Chadwicka-Stearna		156	63
8. Czterocewki Chadwicka-Stearna + pierścień ekwipotencjalny		119	45



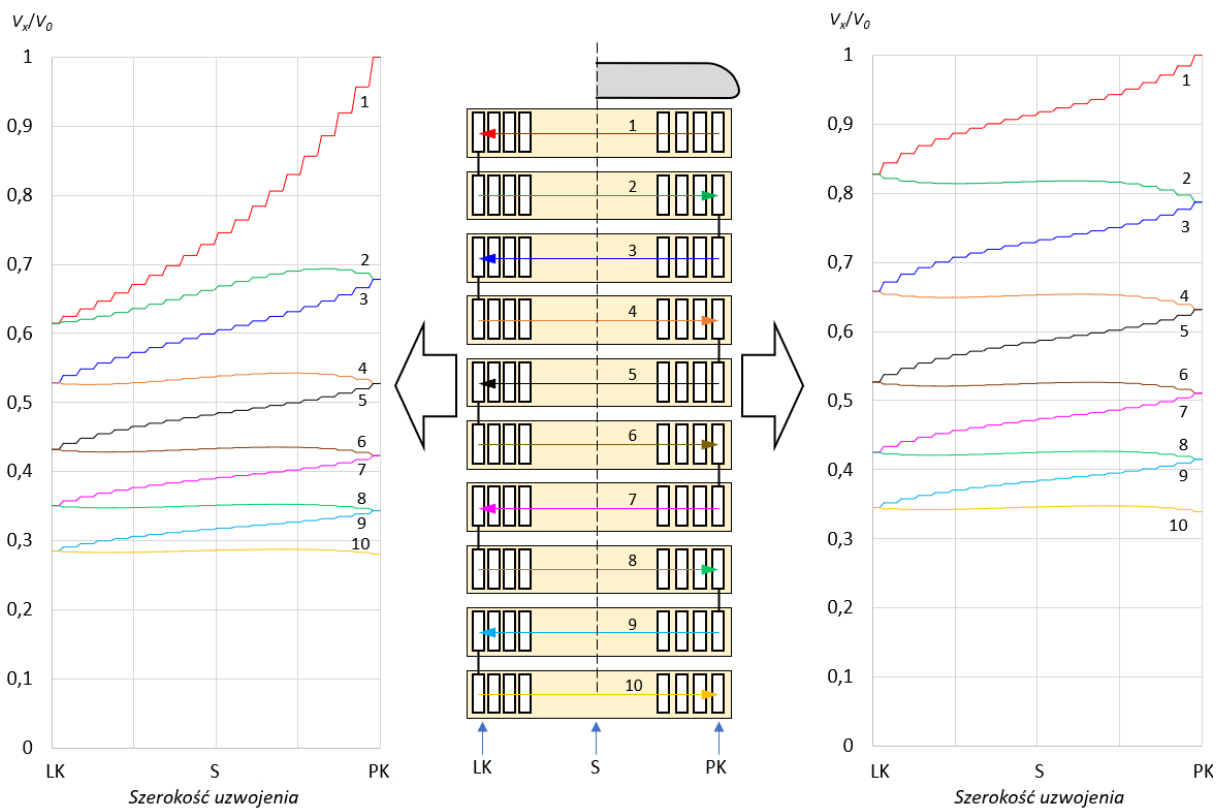
Rys. 8.41 Graficzne porównanie maksymalnych naprężeń elektrycznych (dla  $V_0=1\ V$ ) w uzwojeniu cewkowym o różnych topologiach (oznaczenia topologii jak w Tabeli 8.3);  $E_{max\ z-z}$  – maksymalne natężenie pola pomiędzy dwoma sąsiadującymi zwojami w cewce,  $E_{max\ c1-c2}$  – maksymalne natężenie pola pomiędzy dwoma pierwszymi cewkami uzwojenia

Na podstawie analizy Tabeli 8.3 oraz Rys. 8.41 można zauważyć, że w przypadku uzwojenia wywrotkowego (z pierścieniem i bez), naprężenia międzycewkowe były znacznie większe, niż naprężenia pomiędzy zwojami w cewce. Zastosowanie przeplatania zwojów spowodowało natomiast znaczący wzrost naprężeń międzyzwojowych oraz spadek naprężeń międzycewkowych. Najmniejszymi naprężeniami międzyzwojowymi spośród wszystkich analizowanych uzwojeń zbudowanych z dwucewek, charakteryzuje się uzwojenie Kratochwila, a największymi Chadwicka-Stearna, co wynika z kolejności nawinięcia zwojów w cewkach. W uzwojeniu z czterocewek Chadwicka-Stearna, maksymalne naprężenia międzyzwojowe są znacznie większe niż w przypadku uzwojeń zbudowanych z dwucewek. Zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego w uzwojeniu wywrotkowym oraz z dwucewek i czterocewek z przeplotami Chadwicka-Stearna, spowodowało znaczne ograniczenie maksymalnych naprężeń międzyzwojowych oraz międzycewkowych. Można zatem wyciągnąć wniosek, że po zastosowaniu pierścienia ekwipotencjalnego, zmniejszyła się wypadkowa pojemność szeregową uzwojenia pomiędzy samymi zwojami i cewkami, co w przypadku ograniczania narażeń udarowych nie jest pożądane. Jednakże, pierścień ekwipotencjalny jest silnie sprzężony ze zwojami pierwszej cewki uzwojenia, co z nawiązką kompensuje ograniczenie sprzężenia pomiędzy sąsiadującymi zwojami i cewkami. Należy oczekiwać podobnego efektu działania pierścienia ekwipotencjalnego w dwucewkach i czterocewkach o innych niż przedstawione w Tabeli 8.3 rodzajach przeplotów.

Zastosowanie pierścienia ekwipotencjalnego, zarówno w uzwojeniu wywrotkowym, jak i zbudowanym z dwucewek i czterocewek Chadwicka-Stearna, spowodowało zmniejszenie nieliniowości rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia oraz ograniczenie naprężeń międzyzwojowych i międzycewkowych, w porównaniu do uzwojenia bez pierścienia. Pierścień znajdujący się w przestrzeni jarzmowej uzwojenia, przejmuje pojemnościowe sprzężenie pierwszej cewki do uziemionego jarzma (co nie było przedmiotem analizy w niniejszej pracy). Można zatem wnioskować, że w rzeczywistości, pierścień ma jeszcze ważniejszy wpływ na ograniczanie narażeń przepięciowych w uzwojeniu, niż zaprezentowano w niniejszej pracy. Pierścienie ekwipotencjalne w uzwojeniu cewkowym, spełniają zatem podobną funkcję co ekrany elektrostatyczne w uzwojeniu wielowarstwowym: wyrównują potencjały zwojów w pierwszej i kolejnych cewkach lub warstwach, co przekłada się na bardziej równomierny rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia. Warto zwrócić uwagę, że zastosowanie pierścienia spowodowało zbliżenie do siebie rozkładów potencjału elektrostatycznego wyznaczonych wzdłuż uzwojenia od strony wewnętrznej, zewnętrznej oraz w środku; bez pierścienia, rozkłady te różniły się od siebie (Rys. 8.35d i h, Rys. 8.36d i h). Dodatkowo, analiza wykazała, że pierścień kształtuje i poprawia rozkład pola elektrycznego w przestrzeni między uzwojeniem GN i DN oraz uzwojeniem GN i jarzmem.

Symulacje numeryczne umożliwiają analizę narażeń przepięciowych uzwojenia (w początkowej fazie oddziaływania udaru napięciowego) wzdłuż jego długości oraz w poszczególnych cewkach z osobna. Daje to wiele możliwości wizualizacji rozkładów narażeń, które wzbogacają szczegółową analizę zjawisk zachodzących w uzwojeniu. W niniejszej pracy doktorskiej szczególny nacisk położono na analizę rozkładów przepięć wzdłuż całego uzwojenia, porównując narażenia panujące w różnych jego obszarach. Bardzo ciekawą analizę można również przeprowadzić skupiając się na rozkładach pojemnościowych

potencjału elektrostatycznego w poszczególnych cewkach uzwojenia z uwzględnieniem geometrycznego układu zwojów. Przykładową analizę rozkładów potencjału elektrostatycznego w pierwszych dziesięciu cewkach uzwojenia wywrotkowego przedstawiono na Rys. 8.42. Lewa strona rysunku dotyczy uzwojenia bez pierścienia, a prawa z pierścieniem ekwipotencjalnym. Rozkłady potencjału są wykreślone zgodnie ze strzałkami i kolorową legendą przedstawioną obrazowo na środkowym schemacie wstępnych 10 cewek uzwojenia. Rozkłady przedstawiają zmianę potencjału od lewej (LK) do prawej krawędzi (PK) uzwojenia w poszczególnych cewkach (S – środek uzwojenia).



Rys. 8.42 Porównanie rozkładów potencjału elektrostatycznego w obrębie pierwszych dziesięciu cewek uzwojenia wywrotkowego bez (z lewej) oraz z pierścieniem ekwipotencjalnym (z prawej); LK – lewa krawędź uzwojenia, S – środek uzwojenia, PK –prawa krawędź uzwojenia

Porównując rozkłady potencjału w obrębie poszczególnych cewek uzwojenia z pierścieniem ekwipotencjalnym oraz bez niego, można zauważyć znaczne różnice. Rozkład potencjału w uzwojeniu bez pierścienia jest bardzo nierównomierny (Rys. 8.42 – z lewej). W pierwszej cewce potencjał spada z wartości  $V_0=1$  V do wartości  $0,62V_0$  (kierując się od PK do LK). Następnie, kierując się od wewnątrz (LK) do zewnątrz (PK) drugiej cewki, rozkład jest bardziej równomierny, a potencjał początkowo rośnie do wartości maksymalnej  $0,69V_0$  w szóstym zwoju licząc od prawej krawędzi, a następnie opada do wartości  $0,67V_0$  na skrajnym zewnętrznym zwoju cewki. Analogiczne obserwacje dotyczą kolejnych cewek.

W przypadku uzwojenia z pierścieniem ekwipotencjalnym rozkład potencjału w obrębie kolejnych cewek jest bardziej równomierny (Rys. 8.42 – z prawej), co potwierdza wnioski wyciągnięte z wcześniejszych analiz przedstawionych w rozdziale 8.3.8. W pierwszej cewce

(kierunek od PK do LK) potencjał opada z wartości  $V_0=1$  V do wartości  $0,83V_0$ . W cewce drugiej (kierunek od LK do PK) potencjał najpierw opada, następnie nieznacznie się wyrównuje i ponownie opada z większą stromością do wartości  $0,78V_0$  zbliżając się do prawej krawędzi cewki. Analogiczne obserwacje dotyczą kolejnych cewek.

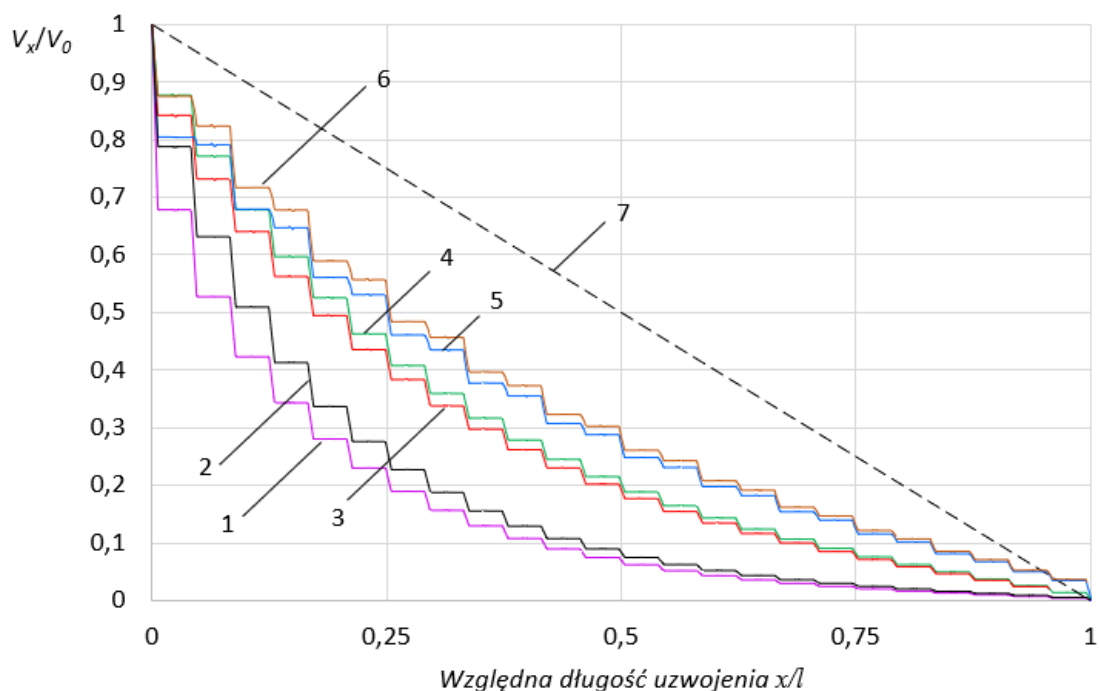
Wspólną cechą rozkładów dla uzwojenia z pierścieniem ekwipotencjalnym i bez niego, jest zagęszczanie się linii rozkładów potencjału wzdłuż kolejnych cewek wraz z oddalaniem się od początku uzwojenia. Im dalej od początku uzwojenia, tym rozkłady potencjału w poszczególnych cewkach są bardziej równomierne, a ich wartości zbliżają się do potencjału ziemi, co potwierdza również wcześniejsze analizy dotyczące uzwojenia wywrotkowego z pierścieniem i bez. Największe gradienty potencjału występują w początkowym obszarze uzwojenia, a następnie maleją w kierunku końca uzwojenia. Warto również zauważyć, że wartości potencjałów w poszczególnych cewkach uzwojenia w punktach LK, S oraz PK odpowiadają rozkładowi potencjału wzdłuż wysokości uzwojenia po stronie wewnętrznej, w środku i po stronie zewnętrznej przedstawione na Rys. 8.35d i Rys. 8.35h.

Zaprezentowana analiza oraz kształt rozkładów potencjału w poszczególnych cewkach uzwojenia z pierścieniem i bez niego, jest w zgodzie z wynikami szczegółowych badań rozkładów napięcia w obrębie początku uzwojenia cewkowego przy wymuszeniach udarowych, zaprezentowanych w pracy [207]. W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono jedynie przykład rozszerzonej analizy rozkładów potencjału w obrębie cewek uzwojenia wywrotkowego, ale analogiczne analizy można przeprowadzić dla uzwojeń o innych topologiach, w celu przeprowadzenia bardziej dogłębnych analiz.

Podsumowując analizę wpływu pierścienia ekwipotencjalnego na zmianę narażeń przepięciowych uzwojenia, można wymienić następujące cechy charakterystyczne wynikające z zastosowania pierścienia:

- wyrównanie potencjałów zwojów w pierwszej i kolejnych cewkach uzwojenia,
- wzrost potencjału skrajnych wewnętrznych zwojów uzwojenia (szczególnie pierwszej cewki) w porównaniu do uzwojenia bez pierścienia,
- wzrost naprężeń elektrycznych pomiędzy uzwojeniem DN i GN,
- zmniejszenie maksymalnych naprężeń międzyzwojowych i międzycewkowych w uzwojeniu,
- zmniejszenie nieliniowości pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia przez silne sprzężenie pojemnościowe z pierwszą cewką uzwojenia oraz eliminację sprzężenia pierwszej cewki do uziemionego jarzma,
- wyrównanie rozkładów potencjału wzdłuż uzwojenia od strony wewnętrznej, zewnętrznej i w środku.

Na Rys. 8.43 przedstawiono stopniową zmianę pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego wyznaczonego wzdłuż zewnętrznych zwojów uzwojenia cewkowego po wprowadzeniu modyfikacji mających na celu poprawienie rozkładu początkowego napięcia (zastosowanie dwucewek i czterocewek splatanych oraz pierścienia ekwipotencjalnego). Można zaobserwować, że każda modyfikacja poprawiała kształt pojemnościowego rozkładu potencjału elektrostatycznego i zbliżała go do liniowego rozkładu końcowego.



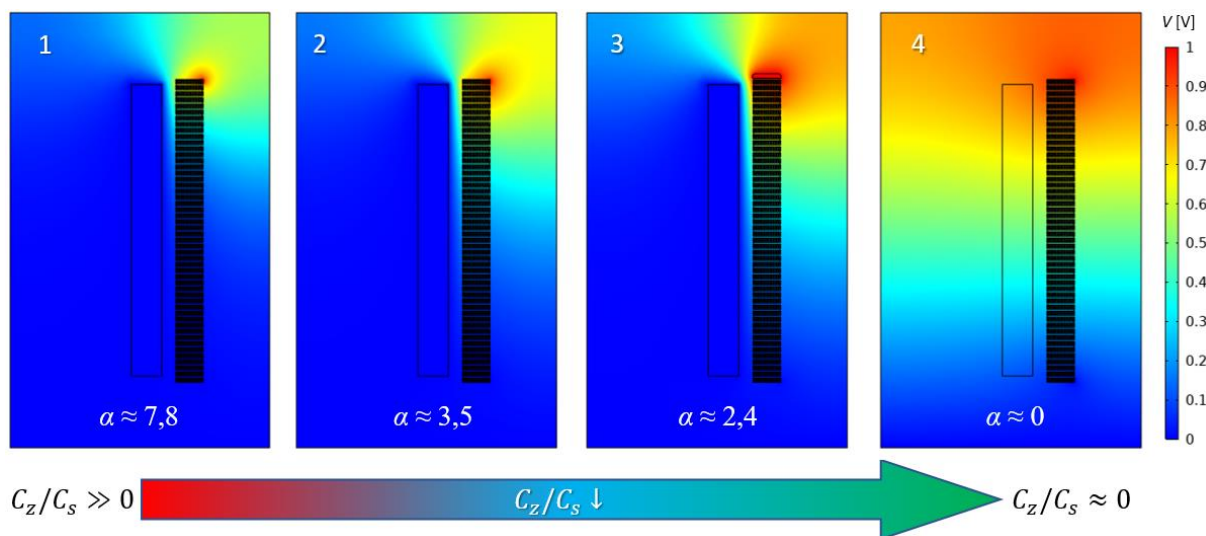
Rys. 8.43 Zestawienie zmian rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego: 1 - wywrotkowego, 2 – wywrotkowego z pierścieniem, 3 - zbudowanego z dwucewek z przeplotami Chadwicka-Stearna, 4 - zbudowanego z dwucewek Chadwicka-Stearna z ekranem ekwipotencjalnym, 5 – zbudowanego z czterocewek Chadwicka-Stearna, 6 - zbudowanego z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem, 7 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Dla rozważanych na Rys. 8.43 topologii uzwojeń wyznaczono współczynnik  $\alpha$ , korzystając z uproszczonej metody Norrisa (wyjaśnionej w rozdziale 5):

- uzwojenie wywrotkowe:  $\alpha=7,8$ ;
- uzwojenie wywrotkowe z pierścieniem ekwipotencjalnym:  $\alpha=5,9$ ;
- uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna:  $\alpha=3,45$ ;
- uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym  $\alpha=3,4$ ;
- uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna:  $\alpha=2,6$ ;
- uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym:  $\alpha=2,4$ .

Wyznaczona wartość współczynnika  $\alpha$  potwierdza zasadność stosowania metod bazujących na zasadzie konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregowej uzwojenia w celu poprawy odporności przepięciowej uzwojenia. Każda modyfikacja przybliżyła rozkład początkowy do końcowego. Poprzez wprowadzone modyfikacje parametr  $\alpha$  zmalał z wartości 7,8 (uzwojenie wywrotkowe) do 2,4 (uzwojenie zbudowane z czterocewek o przeplotach Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym od strony górnej). Dzięki temu znacząco zmalały narażenia przepięciowe uzwojenia w początkowej chwili oddziaływania szybkozmiennego udaru napięciowego. Z powodu poprawy rozkładu początkowego, przepięcia maksymalne będą również zredukowane. Wyrównywanie się rozkładu potencjału wzdłuż uzwojenia cewkowego przez zmniejszanie stosunku pojemności doziemnej do pojemności wzdłużnej uzwojenia ( $C_z/C_s$ ) przedstawiono obrazowo na Rys. 8.44. Na obrazie numer 4 przedstawiono uzwojenie, w którym praktycznie nie występują pojemności doziemne –

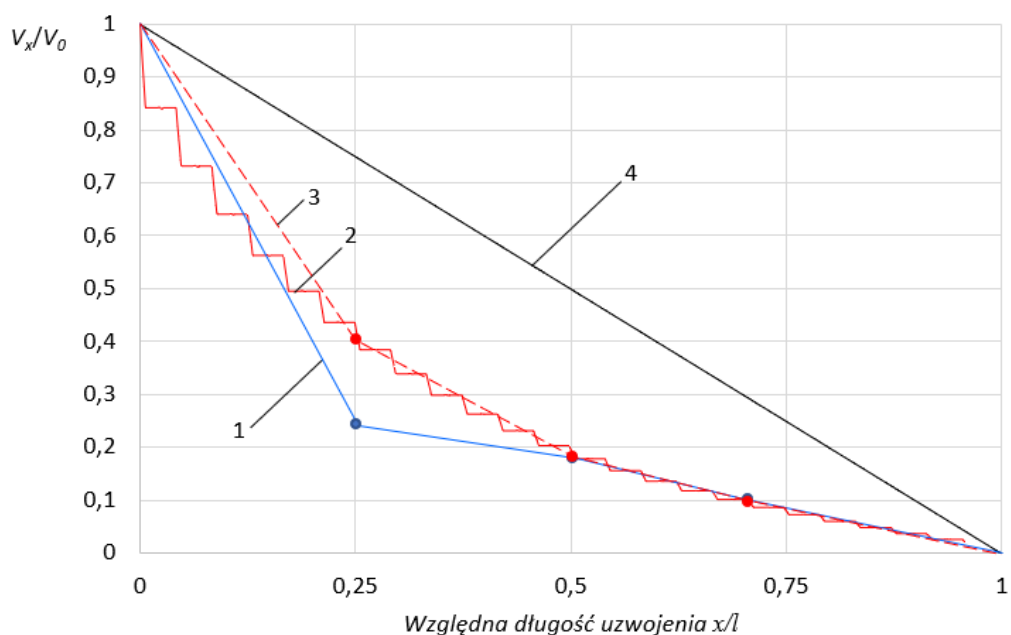
uziemiony jedynie ostatni zwój w dolnej cewce uzwojenia oraz podłoga laboratorium; brak uzwojenia DN.



Rys. 8.44 Wpływ zmiany stosunku pojemności doziemnej  $C_z$  do pojemności wzdłużnej  $C_s$  uzwojenia na zmianę rozkładu potencjału w uzwojeniu: 1 – uzwojenie wywrotkowe, 2 – uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna, 3 – uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym, 4 – uzwojenie wywrotkowe samotne (brak uziemionego uzwojenia DN)

W ramach realizacji niniejszej pracy doktorskiej wyznaczono również pojemnościowe rozkłady potencjału w uzwojeniu, w którym przeploty wg schematu Kratochwila obejmowały jedynie początkowe 20% cewek uzwojenia. Potwierdziło to skuteczność i zasadność stosowania częściowych przeplotów w uzwojeniu w celu zmniejszenia kosztów i skrócenia czasu produkcji, przy jednoczesnym ograniczeniu narażeń napięciowych w krytycznych obszarach uzwojenia. Przeprowadzono również analizy rozkładów pojemnościowych potencjału elektrycznego w uzwojeniach z końcem uziemionym i izolowanym od ziemi. Wykazano, że zaproponowana metodologia nadaje się również do obliczeń uzwojeń, w których koniec nie jest uziemiony.

Na Rys. 8.45 przedstawiono porównanie rozkładu pseudo-początkowego napięcia w uzwojeniu, otrzymanego eksperymentalnie przy wymuszeniu udarem prostokątnym, z otrzymanym symulacyjnie rozkładem początkowym dla uzwojenia zbudowanego z dwucewek Chadwicka-Stearna. Rozkład pseudo-początkowy i początkowy otrzymane symulacyjnie mają taki sam charakter i są zbliżone do siebie dla współrzędnych  $x/l=0-0,2$ . Następnie, otrzymany pomiarowo rozkład opada mocniej w kierunku niższych wartości (jest bardziej nieliniowy) w porównaniu do rozkładu obliczonego. Taka nietypowa różnica między zmierzonym i obliczonym rozkładem może wynikać z obecności w pobliżu uzwojenia, w czasie pomiarów, uziemionych elementów (np. fragmentu klatki probierczej), które nie zostały uwzględnione w symulacji. Takie uziemione elementy wprowadzają dodatkową pojemność doziemną, przez co rozkład początkowy i pseudo-początkowy staje się bardziej nieliniowy. W końcowym obszarze uzwojenia zgodność obliczeń i pomiarów jest bardzo dobra.



Rys. 8.45 Porównanie wyznaczonych eksperymentalnie i obliczeniowo rozkładów napięcia/potencjału w uzwojeniu cewkowym 110 kV: 1 – rozkład pseudo-początkowy otrzymany eksperymentalnie (4 punkty pomiarowe), 2 – rozkład początkowy otrzymany symulacyjnie (uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna), 3 – rozkład początkowy otrzymany symulacyjnie wyznaczony dla 4 punktów pomiarowych analogicznych do wykresu 1, 4 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Symulacje numeryczne potwierdziły korzystny efekt zastosowania przeplatania zwojów w celu poprawy początkowego rozkładu potencjału elektrycznego w uzwojeniu. Różne rodzaje przeplotów mają pewne charakterystyczne cechy, które powinny być brane pod uwagę podczas wyboru schematu przepleceń. Zatem, wybór odpowiedniego rodzaju przepleceń powinien być każdorazowo poprzedzony analizą zalet i wad konkretnego rozwiązania, zarówno pod względem ekonomicznym, jak i technicznym. Niezależnie od wybranego schematu przepleceń, zastosowanie ekranu ekwipotencjalnego umieszczonego w odpowiedniej odległości od uzwojenia (im dalej tym pozytywny wpływ maleje) poprawia rozkład pojemnościowy potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia i wpływa na ograniczenie naprężeń elektrycznych w krytycznych obszarach uzwojenia. Potwierdzona została zatem zasadność stosowania przepleceń oraz pierścieni ekwipotencjalnych.

W celu dodatkowej, jakościowej weryfikacji zastosowanej metodologii wyznaczania rozkładów początkowych w uzwojeniach o różnych konstrukcjach i topologiach oraz zgodności otrzymywanych symulacyjnie wyników z danymi pomiarowymi i literaturowymi, przeprowadzono analizę uzwojenia cewkowego z zastosowanym ekranem elektrostatycznym otaczającym je od strony zewnętrznej na całej wysokości uzwojenia. Ekran był dołączony do początku uzwojenia i znajdował się na wysokim potencjale. Analizę wpływu takiego ekranu na rozkłady początkowe napięcia w uzwojeniu cewkowym przedstawiono w [195]. Autor przeprowadził analizę rozkładów początkowych w uzwojeniu dla różnych wartości współczynnika ekranowania  $k$ , który był zależny od odległości ekranu od uzwojenia.

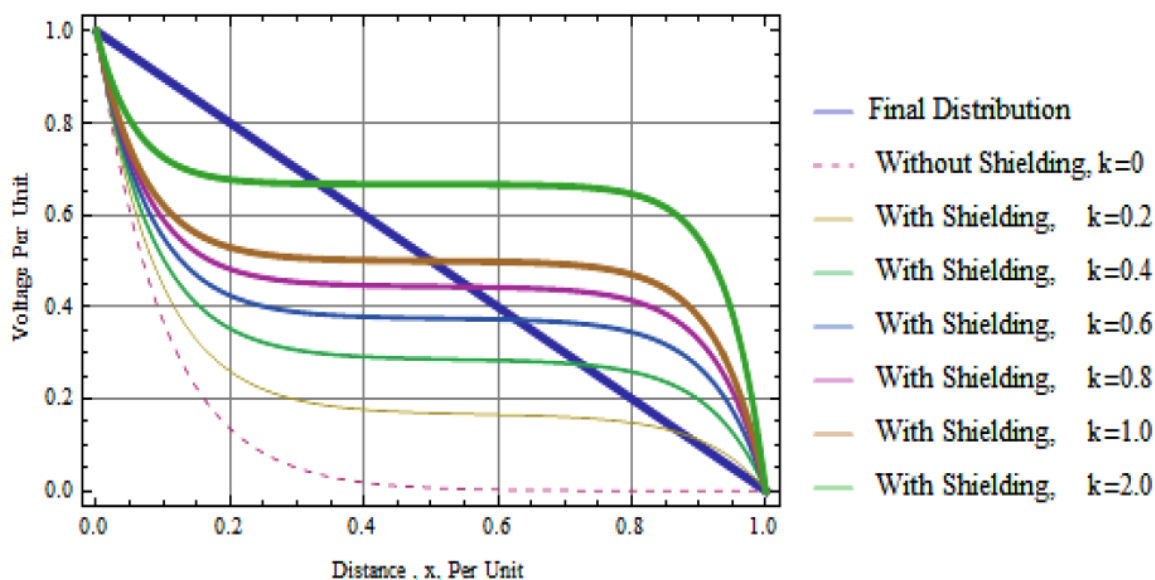
Współczynnik  $k$  był określany jako wielokrotność pojemności doziemnej uzwojenia i wyrażony zależnością (8.1):

$$k = C_m/C_g \quad (8.1)$$

gdzie: -  $C_m$  – pojemność pomiędzy ekranem a uzwojeniem,  $C_g$  – pojemność doziemna.

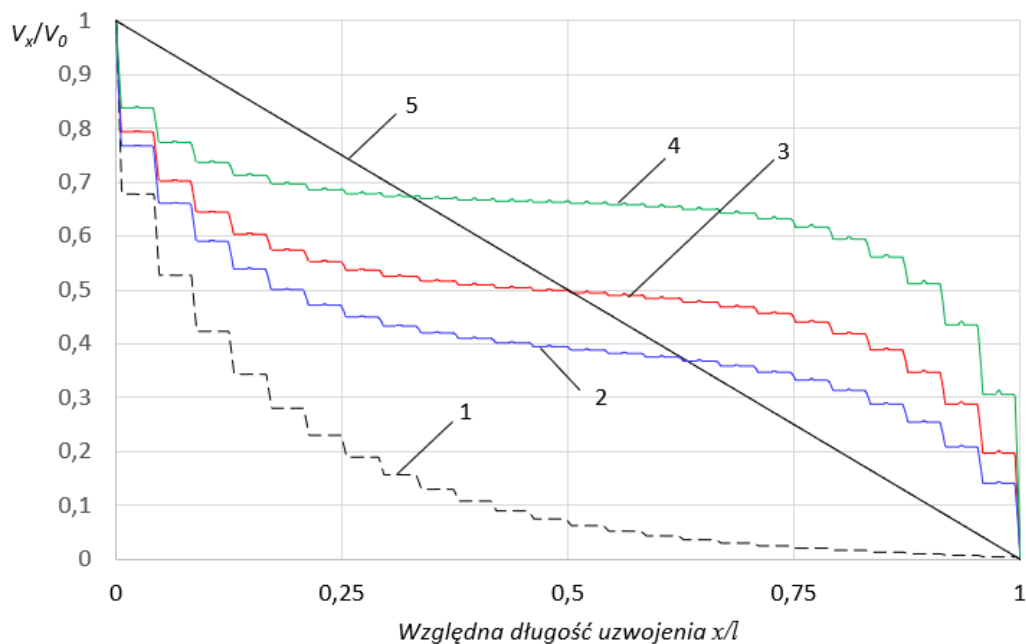
Na Rys. 8.46 przedstawiono otrzymane przez autora pracy [195] wyniki dla uzwojenia bez ekranu oraz z ekranem, dla różnych wartości parametru  $k$ . Na podstawie przeprowadzonej analizy autor wyznaczył optymalną wartość współczynnika  $k=0,92$ , dla której rozkład początkowy znajduje się najbliżej rozkładu końcowego napięcia w uzwojeniu. Warto zauważyć, że charakter rozkładu początkowego napięcia w uzwojeniu cewkowym z ekranem i bez jest odmienny. Rozkład początkowy dla uzwojenia bez ekranu jest taki sam jak dla klasycznych uzwojeń cewkowych. Zastosowanie ekranu sprawiło, że w pobliżu początku i uziemionego końca uzwojenia (początkowe i końcowe 20% względnej długości uzwojenia) występuje stromy spadek napięcia, a w części środkowej (pomiędzy 0,2 i 0,8 względnej długości uzwojenia) następuje wyrównanie napięcia na niemal jednakowym poziomie. Można dostrzec tu pewną analogię do rozkładów otrzymywanych dla ekranowanych uzwojeń warstwowych.

Autor pracy [195] nie podał szczegółowych danych dotyczących geometrii i parametrów analizowanego uzwojenia, dlatego nie było możliwe przeprowadzenie symulacji dla obiektu o takiej samej geometrii. Przeprowadzono natomiast analogiczną analizę dla uzwojenia cewkowego będącego przedmiotem niniejszej pracy doktorskiej. Na Rys. 8.47 przedstawiono otrzymane symulacyjnie rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym wywrotkowym bez ekranu oraz z ekranem otaczającym je od zewnątrz (dla różnych odległości ekranu od uzwojenia). Wyniki przedstawiono na tle idealnego rozkładu końcowego.



Rys. 8.46 Rozkłady początkowe napięcia wzdłuż uzwojenia cewkowego dla różnych wartości parametru  $k$ ;  $k=0$  – uzwojenie bez ekranu (linia przerywana),  $k>0$  – uzwojenie z ekranem otaczającym je od zewnątrz; rozkład końcowy – linia niebieska ciemna [195]





Rys. 8.47 Rozkłady potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego bez ekranu elektrostatycznego (1) i z ekranem otaczającym je od zewnątrz, dla różnych odległości ekranu od uzwojenia: 2 – 78 mm, 3 – 48 mm, 4 – 23 mm); 5 – rozkład końcowy;  $x/l=0$  – początek uzwojenia,  $x/l=1$  – koniec uzwojenia

Porównując rozkłady początkowe wzdłuż uzwojenia przedstawione na Rys. 8.46 (dane z literatury) oraz Rys. 8.47 (wyznaczone symulacyjnie) można zauważyć, że charakter rozkładów jest taki sam zarówno dla uzwojenia bez ekranu, jak i dla uzwojenia ekranowanego. Dodatkowo, można stwierdzić, że rozkład 2 z Rys. 8.47, odpowiada współczynnikowi  $k \approx 0,5$  z Rys. 8.46, rozkład 3 – współczynnikowi  $k \approx 1$ , a rozkład 4 – współczynnikowi  $k \approx 2$ .

Przeprowadzone porównanie obliczonych symulacyjnie i przedstawionych w literaturze [195] rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu potwierdza jakościową zgodność wyników i charakteru rozkładów dla uzwojenia cewkowego bez ekranu oraz z ekranem otaczającym je od zewnątrz. Ilościowe porównanie otrzymanych symulacyjnie i dostępnych w literaturze [195] rozkładów nie jest możliwe ze względu na brak informacji o geometrii uzwojenia.

Badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej, pozwoliły na wyciągnięcie istotnych, praktycznych wniosków dotyczących narażeń przepięciowych występujących w uzwojeniach cewkowych, zarówno tych z przepłotami, jak i bez nich. Zaobserwowane: wpływ kształtu i stromości udaru wymuszającego na propagację przepięć wewnętrznych w uzwojeniu, charakterystyczne cechy poszczególnych topologii przepleceń oraz wpływ zastosowania pierścieni i ekranów ekwipotencjalnych na ograniczenie narażeń przepięciowych izolacji transformatorów, pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w uzwojeniach w czasie oddziaływania szybkozmiennych przebiegów napięciowych. Niemniej jednak, nadal konieczne są dalsze analizy eksperymentalne i symulacyjne mające na celu dokładniejsze opisanie zjawisk zachodzących w uzwojeniu. Dalsze prace symulacyjne powinny być ukierunkowane na poprawieniu analizy ilościowej oraz lepszej korelacji z wynikami eksperymentalnymi.

## 9 Podsumowanie

W celu zapewnienia niezawodnej pracy systemów elektroenergetycznych niezbędna jest szczegółowa analiza narażeń eksploatacyjnych ich poszczególnych elementów składowych. Spośród nich, na szczególną uwagę zasługują transformatory energetyczne ze względu na funkcję jaką pełnią w sieciach elektroenergetycznych. Obecnie, największe transformatory energetyczne budowane są na napięcia rzędu 1 MV oraz moce przekraczające 1,5 GVA (pojedyncze jednostki trójfazowe). Kluczowy wpływ na bezpieczną i niezawodną pracę transformatorów mają narażenia przepięciowe jakim poddawana jest ich izolacja w czasie eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Transformatory cechują się czasem życia i eksploatacji na poziomie 30-50 lat, a obecnie pracują również jednostki ponad 60-letnie. W czasie tak długiej eksploatacji, ich układy izolacyjne są wielokrotnie poddawane działaniu napięć udarowych piorunowych i łączeniowych, dlatego ich konstrukcje muszą cechować się jak największą odpornością na działanie takich zjawisk. Z tego względu, tematyka oddziaływania przepięć na transformatory jest ciągle bardzo aktualna.

Z perspektywy producentów, bardzo ważnym zagadnieniem jest ograniczanie kosztów wytwarzania transformatorów, przy zachowaniu wysokiego współczynnika niezawodności. Jest to szczególnie istotne w dobie rosnących cen surowców i problemów z zapewnieniem łańcucha dostaw poszczególnych komponentów, które są stosowane do wytwarzania urządzeń. Z tego względu konieczne jest prowadzenie prac mających na celu ciągle doskonalenie konstrukcji transformatorów, które umożliwią oszczędności materiałowe oraz poprawę parametrów technicznych, w tym ograniczenie narażeń eksploatacyjnych takich jak narażenia przepięciowe. Kluczowe kierunki rozwoju obejmują obecnie zastosowanie materiałów o lepszych parametrach magnetycznych i wytrzymałościowych oraz modyfikacje konstrukcyjne. Innym ważnym zagadnieniem jest wprowadzanie zmian w procesach wytwarzania, które redukuje czas i pracochłonność wykonywania transformatorów (np. automatyzacja i robotyzacja procesów). W celu weryfikacji poprawności koncepcji, przyjętych założeń i oczekiwanych rezultatów, konieczne jest prowadzenie badań i symulacji, umożliwiających potwierdzenie słuszności obranych kierunków rozwoju i ich szybką, wstępną weryfikację. Niniejsza rozprawa doktorska wpisuje się w obecne trendy rozwoju technologii transformatorowej.

Rozprawa doktorska obejmuje swym zakresem problematykę narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych. Praca jest poświęcona w szczególności analizie narażeń transformatorów w czasie działania szybkozmiennych przepięć powstających w warunkach eksploatacji i podczas prób napięciowych. Praca bazuje na wynikach badań eksperymentalnych przeprowadzonych na unikatowych, pełnowymiarowych uzwojeniach transformatorów energetycznych wysokiego napięcia oraz na analizach teoretycznych wyników symulacji komputerowych na modelach uzwojeń o różnych topologiach.

Celem pracy doktorskiej było zbadanie i analiza wpływu różnych zmian konstrukcyjnych (celowych lub mogących wystąpić w przypadku awarii bądź błędnego

montażu na etapie produkcji) na narażenia przepięciowe w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów. Obiektami badań były dwa uzwojenia transformatorów energetycznych wysokiego napięcia – o konstrukcji wielowarstwowej oraz cewkowej. Ze względu na unikalność konstrukcji uzwojenia wielowarstwowego, część wyników przeprowadzonych prac stanowi informacje wrażliwe dla firmy ABB oraz Hitachi Energy i z tego względu nie wszystkie informacje mogą być opublikowane. Z tego powodu, część analiz ogranicza się do oceny jakościowej oraz uwzględnia tylko te dane, które mogły zostać upublicznione.

**Efektom rozprawy jest:**

- wykonanie badań przepięć narażających układy izolacyjne uzwojeń transformatorów w warunkach eksploatacji podczas wyładowań piorunowych i w warunkach prób napięciem udarowym,
- opracowanie polowych modeli uzwojeń transformatorów do analizy rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w różnych topologiach i konfiguracjach uzwojeń,
- eksperymentalna analiza narażeń przepięciowych wewnętrznych układów izolacyjnych różnego typu uzwojeń transformatorów oraz ocena wpływu różnych czynników na zmianę tych narażeń; dla uzwojenia wielowarstwowego zaproponowano również parametr określający skuteczność ekranów w ograniczaniu narażeń przepięciowych w celu porównania różnych konfiguracji: uzwojenie-ekrany,
- symulacyjna analiza narażeń przepięciowych uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach i konfiguracjach, dla celów oceny wpływu zmian konstrukcyjnych na poziomy narażeń przepięciowych,
- eksperymentalne wyznaczenie rozkładów pseudo-początkowych i rozkładów wartości maksymalnych napięcia dla uzwojeń o konstrukcji cewkowej i warstwowej (o różnych konfiguracjach ekranów elektrostatycznych) przy udarze napięciowym piorunowym; dla uzwojenia cewkowego również przy udarze prostokątnym,
- symulacyjne wyznaczenie pojemnościowych rozkładów potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach o konstrukcji warstwowej (dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów) i cewkowej (dla różnych rodzajów przeplatania zwojów, z zastosowaniem ekranu ekwipotencjalnego, dla uzwojeń częściowo splatanych oraz uzwojeń z końcem izolowanym od ziemi),
- analiza porównawcza narażeń przepięciowych uzwojeń warstwowych i cewkowych uzyskanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach komputerowych,
- ocena wpływu różnych zmian konstrukcyjnych oraz konfiguracji uzwojeń na zmianę poziomów narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń,
- określenie charakterystycznych cech rozkładów początkowych potencjału w uzwojeniach warstwowych ekranowanych i nieekranowanych,
- określenie charakterystycznych cech rozkładów potencjału i natężenia pola elektrycznego w uzwojeniu cewkowym o różnych topologiach.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych narażeń przepięciowych układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach oraz na podstawie symulacji komputerowych rozkładów pola elektrostatycznego, odzwierciedlających warunki panujące w uzwojeniu w początkowej chwili oddziaływania udarów szybkozmiennych, stwierdzono co następuje:

**- dla uzwojenia warstwowego:**

- podczas oddziaływania na uzwojenia transformatorów udarów piorunowych oraz prostokątnych (np. w czasie działania warystorowych ograniczników przepięć), ich układy izolacyjne poddawane są narażeniom odmiennym niż te panujące na zacisku wejściowym uzwojenia; narażenia te są zależne od reakcji uzwojenia na pojawiające się napięcie wymuszające, która wynika ze sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych w uzwojeniu; w uzwojeniu powstają przebiegi wyrównawcze o wartościach maksymalnych przewyższających wartości wynikające z liniowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia przy zasilaniu napięciem o częstotliwości sieciowej;
- wykazano, że reakcja uzwojeń na pojawiające się przepięcia jest uzależniona od ich konstrukcji, topologii i specyficznej konfiguracji zastosowanej w danym typie uzwojeń:
  - podłączenie, odłączenie lub usunięcie ekranów elektrostatycznych w uzwojeniu warstwowym wpływa na zmianę narażeń przepięciowych, w tym na częstotliwość drgań wysokoczęstotliwościowych występujących w początkowych chwilach oddziaływania udarów;
  - podłączenie, odłączenie lub usunięcie ekranów elektrostatycznych w uzwojeniu warstwowym wpływa na wartości maksymalne przepięć wewnętrznych w taki sposób, że odłączenie ekranu liniowego zwiększa poziom przepięć w całym uzwojeniu, a odłączenie lub usunięcie ekranu od strony punktu gwiazdowego, zwiększa poziom przepięć jedynie w obszarach końcowych warstw uzwojenia;
  - wpływ ekranów na przepięcia w środkowej strefie uzwojenia warstwowego jest niewielki, w porównaniu z wpływem na przepięcia w pobliskich ekranom warstwach;
- w przypadku uzwojenia warstwowego wykazano, że najbardziej korzystną, z punktu widzenia odporności na działanie szybkozmiennych przepięć, konfiguracją jest uzwojenie w pełni ekranowane, z ekranami podłączonymi do obu końców; najbardziej niekorzystna konfiguracja dotyczy uzwojenia z odłączonym ekranem wewnętrznym, podczas gdy ekran zewnętrzny był odłączony lub fizycznie zdemontowany z uzwojenia;
- wykazano, że podłączenie ekranu wewnętrznego do początku uzwojenia jest kluczowe dla zapewnienia jego wysokiej odporności na przepięcia; rola ekranu zewnętrznego (uziemionego) jest mniej istotna, ale jego obecność daje znaczne korzyści z punktu widzenia wartości maksymalnych przepięć;
- rozkład pseudo-początkowy napięcia w uzwojeniu warstwowym w pełni ekranowanym jest bardzo korzystny i równomierny - odpowiada parametrowi  $\alpha=1,2-2$ ; świadczy to o bardzo dobrej odporności uzwojenia na przepięcia szybkozmiennie;
- wykazano, że rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu warstwowym dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów znacząco się różnią, co

wynika ze wzmocnienia lub osłabienia sprzężenia pojemnościowego do ekranów, w zależności od rozpatrywanej konfiguracji;

- określono charakterystyczne cechy rozkładów potencjału w uzwojeniach warstwowych z ekranami i nieekranowanymi; rozkład początkowy w uzwojeniu ekranowanym jest bliski liniowemu, a w uzwojeniach bez ekranów oraz z jednym lub dwoma ekranami na wpływającym potencjale, rozkłady te są silnie nieliniowe i mogą prowadzić do powstawania dużych gradientów potencjału i wynikających z nich naprężeń elektrycznych na początkowych, lub końcowych warstwach uzwojenia;
- wykazano, że odległość ekranów do uzwojenia warstwowego wpływa na poziom sprzężenia pojemnościowego i może prowadzić do poprawy lub pogorszenia rozkładu początkowego; udowodniono, że rozkład w środkowej strefie uzwojenia jest praktycznie niezależny od odległości ekranów (w rozważanych granicach odległości), co potwierdzają również wyznaczone eksperymentalnie przebiegi przepięć maksymalnych w różnych konfiguracjach uzwojenia i ekranów;
- wykazano, że rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z ekranami i bez są odmienne, a rozkłady pośrednie (np. tylko z jednym ekranem) posiadają charakterystyczne cechy rozkładów panujących w uzwojeniach ekranowanych i nieekranowanych – przejście pomiędzy rozkładami zachodzi w sposób płynny;
- symulacje numeryczne potwierdziły wnioski wynikające z badań eksperymentalnych i pozwoliły rozszerzyć analizę i zrozumienie zjawisk przepięciowych zachodzących w uzwojeniach warstwowych ekranowanych i nieekranowanych;

**- dla uzwojenia cewkowego:**

- analiza narażeń układu izolacyjnego uzwojeń cewkowych od udaru prostokątnego i piorunowego pozwoliła na wyciągnięcia analogicznych wniosków, pomimo różnego kształtu i stromości udaru wymuszającego;
- wykazano, że najbardziej narażoną przepięciowo częścią uzwojenia cewkowego są jego początkowe cewki – do ok. 75% wysokości uzwojenia; w tym obszarze występują oscylacje wysokoczęstotliwościowe o znacznych amplitudach;
- wykazano, że w żadnym punkcie analizowanego uzwojenia cewkowego wartość maksymalna przepięć nie przekracza wartości szczytowej doprowadzonego udaru;
- potwierdzono, że rozkład pseudo-początkowo przy oddziaływaniu udarów prostokątnych i piorunowych jest nierównomierny; szczególnie dla współrzędnych  $x/l=0,75 - 1,0$  wysokości uzwojenia;
- potwierdzono, że kształt rozkładów chwilowych napięcia w uzwojeniu zmienia się z czasem oddziaływania napięcia udarowego;
- wyznaczono rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach cewkowych wywrotkowych oraz zbudowanych z dwucewek o różnych schematach splatania oraz z czterocewek splatanych; wykazano, że wszystkie te rozkłady są nieliniowe; najbardziej niekorzystny jest rozkład w uzwojeniu wywrotkowym; zastosowanie dwucewek poprawia sytuację, a dla czterocewek efekt jest jeszcze lepszy;

- zbadano wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na narażenia przepięciowe w uzwojeniu cewkowym o różnych topologiach i wykazano, że ekran ekwipotencjalny znacząco poprawia początkowy rozkład potencjału w uzwojeniach wywrotkowych oraz splatanych;
- wyznaczono rozkład początkowy potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu częściowo splatnym i zaobserwowano zmianę nachylenia krzywej rozkładu początkowego w miejscu przejścia ze strefy splatanej do niesplataney; wykazano, że w części splatanej najbardziej naprężana jest izolacja zwojowa, a w części niesplataney izolacja międzycewkowa;
- wyznaczono rozkłady początkowe dla uzwojeń o różnych parametrach  $\alpha$  w sytuacji, gdy koniec uzwojenia jest izolowany od ziemi i porównano z rozkładami dla analogicznych uzwojeń z uziemionym końcem; wykazano różnice w rozkładach początkowych potencjału dla uzwojeń o parametrach  $\alpha \leq 3$  z końcem izolowanym i uziemionym oraz udowodniono, że dla większych wartości  $\alpha$  rozkłady te są praktycznie jednakowe.

Na podstawie przeprowadzonych badań i symulacji wykazano, że do skutecznej oceny narażeń przepięciowych uzwojeń transformatora, konieczna jest nie tylko znajomość wartości szczytowej i kształtu udaru doprowadzonego do uzwojenia, ale również wiedza o odpowiedzi uzwojenia na pojawiające się przepięcie. Na podstawie analizy narażeń przepięciowych określono charakterystyczne cechy rozkładów początkowych i pseudo-początkowych napięcia w uzwojeniach warstwowych i cewkowych oraz przedstawiono wnioski o istotnym znaczeniu praktycznym dla projektantów i konstruktorów transformatorów, dotyczące narażeń przepięciowych uzwojeń. Wnikliwie przeanalizowano różne topologie konstrukcji warstwowych i cewkowych. Zaobserwowane charakterystyczne cechy rozkładów początkowych oraz wpływ zmian konstrukcyjnych na zmianę narażeń przepięciowych uzwojeń, pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w tych uzwojeniach w czasie oddziaływania przepięć szybkozmiennych. Wykazano, że zastosowanie modeli elektrostatycznych rozkładów pola w uzwojeniach jest bardzo istotne dla rozszerzenia analiz narażeń przepięciowych uzwojeń o różnych konstrukcjach. Konieczne są jednak dalsze prace nad doskonaleniem modeli oraz narzędzi obliczeniowych w celu poprawienia analizy ilościowej oraz lepszej korelacji z wynikami badań eksperymentalnych.

Na podstawie przeprowadzonych w pracy wnikliwych badań eksperymentalnych, symulacji komputerowych oraz analiz, potwierdzono tezę rozprawy. Szczególnie wykazano, że opracowanie rozkładów pseudo-początkowych napięcia w uzwojeniach (na podstawie badań eksperymentalnych) oraz teoretyczne symulacje rozkładów potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach o różnych topologiach, istotnie rozszerzają możliwości analizy skutków narażeń układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów od przepięć i pozwalają na doskonalenie ich konstrukcji w celu poprawy odporności na działanie przepięć.

Autor rekomenduje rozszerzenie prac w zakresie modelowania zjawisk przepięciowych w uzwojeniach, w kierunku:

- poprawy ilościowej korelacji danych eksperymentalnych i symulacyjnych,
- uwzględnienia sprzężeń pojemnościowo-indukcyjnych,
- modelowania zjawisk rezonansowych w uzwojeniach.

## 10 Literatura

- [1] Abeywickrama N., Serdyuk Y., Gubanski S.: Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers; IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, pp. 1432–1438, Jul. 2008.
- [2] Abeywickrama N., Serdyuk Y., Gubanski S.: Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA); IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1375–1382, Jul. 2006.
- [3] Abeywickrama N.: Effect of dielectric and magnetic material characteristics on frequency response of power transformers; Ph.D. dissertation, Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, Dec. 2007.
- [4] **Adamczyk B.**, Banaszczyk J., Meier P., Liu R., Velthuis R., Wysocki W.: Patent EP3544035A1: Repairing gel insulation of electrical devices, 2018.
- [5] **Adamczyk B.**, Florkowska B.: Analiza warunków sterowania pola elektrycznego w wysokonapięciowych izolatorach przepustowych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 30, s. 13-16, Gdańsk 2011.
- [6] **Adamczyk B.**, Florkowski M., Świątkowski M., Maliszewski A., Ketner A.: Analiza przepięć w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego; X Konferencja Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów, Wisła, 11-13 maja 2016.
- [7] **Adamczyk B.**, Florkowski M., Świątkowski M.: Effect of Shielding on Surge Overvoltages in Multilayer type Windings of Power Transformer, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 3, 2016.
- [8] **Adamczyk B.**, Florkowski M.: Analiza rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 92, Nr 10/2016.
- [9] **Adamczyk B.**, Florkowski M.: Modelowanie narażeń elektrycznych w układzie izolacyjnym transformatora energetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, R.88, 05a/2012; s. 90-93.
- [10] **Adamczyk B.**, Florkowski M.: Simulation of initial voltage distribution in layer type transformer winding; Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2015, Pilsen, Czech Republic, 23-28 August 2015.
- [11] **Adamczyk B.**, Furgał J., Kuniewski M.: Analiza przepięć w uzwojeniach transformatorów; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91, Nr 7/2015.
- [12] **Adamczyk B.**, Furgał J.: Analiza przepięć w transformatorach energetycznych; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 36, Gdańsk, 2013.
- [13] **Adamczyk B.**: Analiza techniczno-ekonomiczna uzwojeń wielowarstwowych do transformatorów mocy, ABB Forum Transformatory Energetyczne 2014, ISBN 978-83-924841-0-3, 2014, s. 77-95.

- [14] **Adamczyk B.:** Analiza przepięć w transformatorach energetycznych; Praca magisterska, Wydział EAIiE AGH, Kraków, 2010.
- [15] Agarwal R., Li H., Guo Z., Cheetham P.: The Effects of PWM With High dv/dt on Partial Discharge and Lifetime of Medium-Frequency Transformer for Medium-Voltage (MV) Solid State Transformer Applications; IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 4, pp. 3857-3866, April 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3174243.
- [16] Akbari A., Werle P., Borsi H., Gockenbach E.: Transfer function-based partial discharge localization in power transformers: a feasibility study; El.Ins.Mag., IEEE, Vol. 18, Iss. 5, July-August 2002, pp. 5-16.
- [17] Albright J.W.: Thyrite Protection for Series Windings of Autotransformers [includes discussion]; Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems (Volume: 74, Issue: 3, January 1955), pp. 150-155.
- [18] Aloszko P., Grecki F., Jez R., Obrebski K., Czopek M., Ostrogorska M.: Patent EP3316070A1: Power Electronic Tap Changer Module For Transformer; 2016.
- [19] Aloszko P., Obrebski K., Grecki F., Ostrogorska M., Jez R., Sobczak W., Czopek M., Piasecki W.: Patent EP3382869A1: On-load power electronic tap-changer with power electronic valves; 2017.
- [20] Anahara R., Hattori S.: 275 kV 117000 kVA oscillation-free transformers for Nagoya substation; Fuji Denki Review, Vol. 2, No. 3, pp. 69-76, 1956.
- [21] Antosz A.: Oleje transformatorowe – stan aktualny i perspektywy rozwoju; Nafta-Gaz, R. 66, nr 3; 2010; str. 222—227; ISSN 0867-8871.
- [22] Avila-Rosales J., Alvarado F.L.: Nonlinear frequency dependent transformer model for electromagnetic transient studies in power systems; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 11, pp. 4281–4288, Nov. 1982.
- [23] Bagheri M., Hekmati A., Heidarzadeh R., Naderi M.S.: Impulse Voltage Distribution in Intershiield Disk Winding vs Interleaved and Continuous Disk Winding in Power Transformer; 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia.
- [24] Bagheri M., Vakilian M., Hekmati A.: Influence of Electrostatic Shielding of Disk Winding on Increasing the Series Capacitance in Transformer; IEEE conference Powertech 2007, Lausanne, Switzerland.
- [25] Banaszak S., Gawrylczyk K.M., Trela K.: Frequency Response Modelling of Transformer Windings Connected in Parallel; Energies 13, no. 6: 1395, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13061395>.
- [26] Banaszak S., Gawrylczyk K.M.: Wave Phenomena in High-Voltage Windings of Transformers; Acta Physica Polonica A 125, no. 6: 1335-1339; 2014.
- [27] Banaszak S., Gawrylczyk K.: Wpływ parametrów rdzenia i innych uzwojeń transformatora na charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia, Przegląd Elektrotechniczny, Nr: 10/2014, s. 23, doi: 10.12915/pe.2014.10.6.



- [28] Banaszak S., Gawrylczyk K.M., Trela K., Bohatyrewicz P.: The Influence of Capacitance and Inductance Changes on Frequency Response of Transformer Windings; *Applied Sciences* 9, no. 5: 1024, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9051024>.
- [29] Banaszak S., Gawrylczyk K.M.: Frequency response of the transformer model with simulated windings deformations and electric faults; *IET 8th Int. Conf. on Computation in Electromagnetics (CEM 2011)*, Wroclaw, 2011, pp. 1-2, doi:10.1049/cp.2011.0035.
- [30] Banda C.A., Van Coller J.M.: Resonant overvoltages in wind turbine transformers; *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2015.7232317.
- [31] Beisele C., Baer D., Stecher H.: Patent EP3430629B1: Electrical insulation system based on epoxy resins for generators and motors; 2016.
- [32] Berge T., Pettersen O.Kr.Ø., Sørsdal S.: Active cancellation of transformer noise: Field measurements; *Applied Acoustics* Volume 23, Issue 4, 1988, pp. 309-320.
- [33] Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL): *Transformers*; 2nd edition, McGraw Hill, ISBN: 9780070483156, 2003.
- [34] Bhuyan K., Chatterjee S.: Non Linear Voltage Distribution in Windings of Power Transformer; *Int'l. J. Eng. Research Technology (IJERT)*, ISSN: 2278-0181, Vol. 1, No. 4, pp. 1-5, 2012.
- [35] Biernacki R., Ruciński A., Małczak C.: Skuteczna ochrona środowiska przed wyciekami oleju z transformatora; *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, Nr 7 (461), Lipiec 2009.
- [36] Bjerkan E., Høidalen H.: High frequency FEM-based power transformer modeling: Investigation of internal stresses due to network initiated overvoltages; *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 11, pp. 1483-1489, 2007.
- [37] Bjerkan E.: High frequency modeling of power transformers: Stresses and diagnostics; Ph.D. dissertation, Norwegian Inst. Technol., Trondheim, Norway, Nov. 2005.
- [38] Boczar T., Zmarzly D.: Optical spectra of surface discharges in oil; *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 3, pp. 632-639, June 2006, doi: 10.1109/TDEI.2006.1657978.
- [39] Bolotinha M.: Gas-insulated transformers: Technology overview, *Transformers Magazine*, Vol. 5, Issue 4, 2018.
- [40] Borucki S., Boczar T., Cichoń A., Frącz P.: The analysis of the impact point of the power transformer core of torsional load on the measured parameters of the vibroacoustics signals; *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Juan, PR, USA, 2012, pp. 175-178, doi: 10.1109/ELINSL.2012.6251452.
- [41] Broszura informacyjna firmy SIEMENS: Extending transformer lifecycles with drying: SITRAM® DRY – stationary transformer drying and moisture monitoring with TLM™ – Transformer Lifecycle Management™, 2010; [http://sm-industry.ru/titan\\_img/ecatalog/TLM\\_SITRAM\\_Dry\\_Brochure\\_EN.pdf](http://sm-industry.ru/titan_img/ecatalog/TLM_SITRAM_Dry_Brochure_EN.pdf)
- [42] Broszura produktowa ABB: Liquid-filled power transformers; 2009, [www.abb.com](http://www.abb.com).

- [43] Buchacz J.: Analiza zesterzenia izolatorów przepustowych typu OIP za pomocą metody FDS i wyników badań oleju; Rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki i Energii Odnawialnej, Politechnika Opolska, Opole, 2015.
- [44] Buikema H., Van der Ploeg F.D.: Active noise control in practice: transformer station; EuroNoise 2015, 31 May - 3 June, Maastricht.
- [45] Chadwick A.T., Ferguson J.M., Ryder D.H., Stearn G.F.: Design of power transformers to withstand surges due to lightning, with special reference to a new type of winding; Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering, Vol. 97, Issue 60, 1950, pp 737-744.
- [46] Chan L.: 20 years operating experience of gas insulated transformer; IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002, pp. 522-524 vol.1, doi: 10.1109/TDC.2002.1178442.
- [47] Chen B., Shen C., Lv P., Han W., Yang Y., Li J.: Voltage Distribution of Transformer Winding under the Fast Transient Pulse; 2020 6th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), XI'AN, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/GEMCCON50979.2020.9456699.
- [48] Ciesielski M., Klys P., Michalski Ł., Kmita G.: Patent WO2021239832A1: Hybrid transformer core and method of manufacturing a transformer core; 2021.
- [49] Cieśla A.: Elektrotechnika – Elektryczność i Magnetyzm w przykładach i zadaniach; AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006 , ISBN 83-7464-064-2.
- [50] CIGRE TB 673: Guide on transformer transportation; Paris, 2016; <https://e-cigre.org/publication/673-guide-on-transformer-transportation>.
- [51] Ciok Z.: Utylizacja sześćofluorku siarki (SF6); Przegląd Elektrotechniczny, 1k/2005, s. 53-56.
- [52] Comsol Multiphysics documentation - AC/DC module.
- [53] Cornick K., Filliat B., Kieny C., Muller W.: Distribution of very fast transient overvoltages in transformer windings; CIGRE Report, Paper 12- 204, 1992.
- [54] Costa J.V., Silva D.F.F.D., Branco P.J.C.: Large-Power Transformers: Time Now for Addressing Their Monitoring and Failure Investigation Techniques; Energies 2022, 15, 4697; <https://doi.org/10.3390/en15134697>.
- [55] Cremasco A., Rothmund D., Curti M., Lomonova E.A.: Voltage Distribution in the Windings of Medium-Frequency Transformers Operated With Wide Bandgap Devices; IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 4, pp. 3587-3602, Aug. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3064702.
- [56] Dąbrowski M.: Naukowe podstawy powstania i rozwoju transformatorów; Biuletyn Techniczno-Informacyjny Zarządu Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich; Nr 5/2006 (34), ISSN 1428-8966, s. 16-23.
- [57] Dąbrowski M.: Początki rozwoju transformatorów; Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2005; ISBN 83-7314-028-x.

- [58] de Leon F., Semlyen A.: Complete transformer model for electromagnetic transients; IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 231–239, Jan. 1994.
- [59] de Leon F., Semlyen A.: Detailed modeling of eddy current effects for transformer transients; IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 2, pp. 1143–1150, April 1994.
- [60] De S., De A., Bandyopadhyay G.: Self-capacitance grading approach to suppress winding resonance in EHV transformers under oscillatory terminal disturbances; IET High Voltage, 2018, 3, (4), pp. 310–315; 10.1049/hve.2018.5028.
- [61] Degeneff R.C., McNutt W.J., Neugebauer W., Panek J., McCallum M.E., Honey C.C.: Transformer Response to System Switching Voltages; IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-101, No. 6, June 1982, pp. 1457-1470.
- [62] Dent B.M., Harthill E.R., Miles J.G.: A Method of analysis of transformer impulse voltage distribution using a digital computer; Proc. of the IEE, Vol. 105, No. 23, 1958, pp. 445-59.
- [63] Dokumentacja wewnętrzna ABB.
- [64] Dong X., Zhu D., Wang C., Tan K., Liu Y.: Simulation of Transformer PD Pulse Propagation and Monitoring for a 500 kV Substation; IEEE Trans. On Dielect. Ins., Vol. 6, No. 6, December 1999, pp. 803-813.
- [65] Dyszlewska K.: Transformator jako źródło hałasu; ABB Forum Transformatory Energetyczne, 18-19 listopada 2014, s. 237-250, ISBN 978-83-924841-0-3.
- [66] ELECTRA N°321: The Condition of Solid Transformer Insulation at End-of-Life; April 2022; <https://electra.cigre.org/321-april-2022/reference-paper/the-condition-of-solid-transformer-insulation-at-end-of-life.html>.
- [67] Elrajoubi A.M., Ang S.S.: High-Frequency Transformer Review and Design for Low-Power Solid-State Transformer Topology; 2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662131.
- [68] Feng R., Che C., Zhao J., Wang Q., Zhao L., Yang W.: Research on Influencing Factors of Very Fast Transient Overvoltage in EHV GIS; 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279414.
- [69] Fergestad P. I., Henriksen T.: Inductances for the calculation of transient oscillations of transformer windings; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 2, pp. 510–517, March 1974.
- [70] Fergestad P.I., Henriksen T.: Transient oscillations in multiwinding transformers; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 2, pp. 500–509, March 1974.
- [71] Flisowski Z., Kosztaluk R.: Metody redukcji przepięć w sieciach elektrycznych; Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11 /2001, s. 269-273.
- [72] Flisowski Z.: Technika wysokich napięć; WNT, wydanie czwarte, Warszawa 1999.

- [73] Florkowska B., Florkowski M., Furgał J., Roehrich J., Zydrón P.: Impact of fast transient phenomena on electrical insulation systems; Wydawnictwa AGH, Kraków 2012, ISBN 978-83-7464-480-8.
- [74] Florkowska B.: Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych; UWND, AGH, Kraków, 2009.
- [75] Florkowski M., Furgał J.: Detection of transformer winding deformations based on the transfer function - Measurements and simulations; Meas. Sci. Technol., vol. 14, pp. 1986–92, Sep. 2003.
- [76] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Propagation of Overvoltages in the Form of Impulse, Chopped and Oscillating Waveforms in Transformer Windings - Time and Frequency Domain Approach; Energies 2020, 13, 304; doi:10.3390/en13020304.
- [77] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Simulation of overvoltages transferred through transformers in EMTP-ATP software; 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPE.2017.7967285.
- [78] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines; Wydawnictwa AGH, Kraków 2013, ISBN 978-83-7464-614-7.
- [79] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., Pająk P.: Overvoltage Impact on Internal Insulation Systems of Transformers in Electrical Networks with Vacuum Circuit Breakers; Energies 2020, 13, 6380. <https://doi.org/10.3390/en13236380>.
- [80] Florkowski M., Furgał J.: Application of the transfer function to recognition of resonance overvoltages in transformer windings; Measurement Science and Technology; 2010; 21. 125702. 10.1088/0957-0233/21/12/125702.
- [81] Furgał J., Roehrich J.: Analiza przebiegów w uzwojeniach transformatorów; Nowa myśl w elektroenergetyce, SNT 2006: materiały I Sympozjum Naukowo-Technicznego: Lublin, 2006, s. 6 –11.
- [82] Furgał J.: Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskriernikowymi i beziskriernikowymi ogranicznikami przepięć; Rozpr. i Monogr.; AGH, Kraków, ISSN 0867-6631, 2003.
- [83] Furgał J.: Analysis of Overvoltages in Windings of Power Transformers Protected by Use of Metal Oxide Surge Arresters; Europ. Trans. on Electr. Pow. Engin., No 19, 2009, pp. 400 – 410.
- [84] Furgał J.: Układy izolacyjne urządzeń stacji wysokiego napięcia, Wydawnictwa AGH, ISSN 0239-6114, 1995.
- [85] Galczak J.: Ochrona transformatorów w sieci przy użyciu ograniczników przepięć z tlenków metali; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2009, s. 99-126, ISBN 978-83-924841-6-5, 2009.
- [86] Gawrylczyk K.M., Banaszak S.: Recent Developments in the Modelling of Transformer Windings; Energies 2021, 14, 2798. <https://doi.org/10.3390/en14102798>.

- [87] Goshima H., et al.: Fundamental insulation characteristics of high-pressure CO<sub>2</sub> gas for gas-insulated power equipment - effect of coating conductor on insulation performance and effect of decomposition products on creeping insulation of spacer; *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 4, pp. 1023-1030, August 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4591223.
- [88] Gómez P., Espino-Cortés F., León F.: Computation of the dielectric stresses produced by PWM type waveforms on medium voltage transformer windings; *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2011*; pp. 199-202; 10.1109/CEIDP.2011.6232631.
- [89] Greenwood A.: *Electrical Transients in Power Systems*; Wiley-Interscience, 2nd ed., ISBN: 978-0-471-62058-7, 1991.
- [90] Gunawardana M., Fattal F., Kordi B.: Very Fast Transient Analysis of Transformer Winding Using Axial Multiconductor Transmission Line Theory and Finite Element Method; *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 5, pp. 1948-1956, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2932669.
- [91] Gurumurthy G.R., Ansari M.Z.A., Amarnath J.: Reduction of voltage stresses in power transformer windings due to surges; *CEIDP '05; 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005, Nashville, TN, USA, 2005*, pp. 51-54, doi: 10.1109/CEIDP.2005.1560618.
- [92] Gustavsen B., Martín C., Portillo Á.: Time-Domain Implementation of Damping Factor White-Box Transformer Model for Inclusion in EMT Simulation Programs; *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 2, pp. 464-472, April 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2902447.
- [93] Gustavsen B., Portillo Á., Ronchi R., Mjølve A.: High-Frequency Resonant Overvoltages in Transformer Regulating Winding Caused by Ground Fault Initiation on Feeding Cable; *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 699-708, April 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2700043.
- [94] Gustawicz B.: *Podręcznik elektrotechniczny dla monterów, maszynistów i właścicieli urządzeń elektr.*; Warszawa, 1913, nakładem Księgarni E. Wende i Ski.
- [95] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A.: *Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych*, WNT, Warszawa, 1983.
- [96] Hasterman Z.: *Przebiegi udarowe w transformatorach*, PWN, Warszawa, 1960.
- [97] Heidarzadeh M., Besmi M.R.: Influence of transformer layer winding parameters on the capacitive characteristic coefficient; *International Journal on „Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE)*, Iss. 15, Vol. 5, No. 2, Jun. 2013.
- [98] Heindl M., Tenbohlen S., Wimmer R.: Transformer Modeling Based On Standard Frequency Response Measurements; *XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011*.
- [99] Horvat M.F., Jurković Z., Jurišić B., Župan T., Čučić B.: Black-Box Power Transformer Winding Model; *2022 7th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, Baiona, Spain, 2022, pp. 18-23, doi: 10.23919/ARWtr54586.2022.9959949.

- [100] Hosseini S.M.H., Vakilian M., Gharehpetian G.B.: Comparison of Transformer Detailed Models for Fast and Very Fast Transient Studies; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 733-741, Apr. 2008.
- [101] IEC 60076-3:2013: Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.
- [102] IEEE C57.12.00-2021: IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
- [103] Jabłoński M.: Transformator z lotu ptaka; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2007, ISBN 978-83-924841-9-6, 2007, s. 13-30.
- [104] Jafari A.M., Akbari A.: Partial discharge localization in transformer windings using multi-conductor transmission line model; Electric Power Systems Research, vol. 78, pp. 1028-1037, June 2008.
- [105] Jeziński E.: Transformatory; WNT, Warszawa 1983 (rozdziały 12 i 13 opracowane przez Zygmunta Hastermana).
- [106] Kabir F., Foggo B., Yu N.: Data Driven Predictive Maintenance of Distribution Transformers; 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2018) Tianjin, 17-19 Sep. 2018.
- [107] Kanicki A., Wiśniewski J.: Transformator w sieci elektroenergetycznej; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2010, s. 39-80; ISBN 978-83-924841-5-8, 2010.
- [108] Karmakar S.: Vegetable Oil is an Alternative Fluid to Mineral Oil Used in High Voltage Application: An Experimental Study; 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), Budapest, Hungary, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICD.2018.8514606.
- [109] Kaźmierski M.: Diagnostyka i monitoring transformatorów w eksploatacji; ABB Forum Transformatory Energetyczne, 20-21 listopada 2007, s.141-188, ISBN 978-83-924841-9-6.
- [110] Ketner A.: Maliszewski A.: Koncepcja uzwojenia podstawowego do wysokonapięciowych transformatorów energetycznych, Łódź, 2011 – dokumentacja wewnętrzna ABB.
- [111] Ketner A.: Narażenia napięciowe izolacji transformatorów podczas prób; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2006, s. 209-226; ISBN 83-924481-1-8, 2006.
- [112] Ketner A.: Narażenia napięciowe zacisku neutralnego w eksploatacji i podczas prób wytrzymałości elektrycznej; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2008, s. 121-134; ISBN 978-83-924841-8-9, 2008.
- [113] Kontani Y., Kobayashi T., Tamura Y., Buhr T., Thompson P. M.: Gas insulated transformer application for an environmentally-friendly power station upgrade; PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/TDC.2012.6281489.
- [114] Kosztaluk R.: Skuteczność układów dławikowych Szpora do ochrony odgromowej rozdzielni 15...110 kV; Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/1967, s. 286-290.
- [115] Kowalczewski M., Mysiński W.: Historia rozwoju transformatorów toroidalnych; Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 4/2018 (120), s. 249-252.

- [116] Kozupa M., Kmita G., Świątkowski M.: *Vibroacoustic Behavior of Power Transformer*; International Conference on Engineering Vibration; Ljubljana, Slovenia 2015.
- [117] Kratochwil Z.: *Sposób wykonania cylindrycznych uzwojeń transformatorów o zwiększonej wytrzymałości udarowej*, Patent PL 43104, 1960.
- [118] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A.: *Transformer Engineering: Design and Practice* (1st ed.); CRC Press., 2004; <https://doi.org/10.1201/9780367800598>.
- [119] Kuniewski M., Zydrón P.: *Analysis of the Applicability of Various Excitation Signals for FRA Diagnostics of Transformers*; 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), Budapest, Hungary, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICD.2018.8514677.
- [120] Kuniewski M.: *Analiza przepięć przenoszonych przez uzwojenia transformatorów energetycznych*; Rozprawa doktorska, Wydział EAIiB AGH, Kraków, 2013.
- [121] Leśniewska-Komeża E.: *Przekładniki – Modelowanie z zastosowaniem metod numerycznych*; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010, ISBN 978-83-204-3673-0.
- [122] Liu L., Wang S., Pan Y., Peng Z.: *Analysis of lightning impulse response of cast resin dry-type transformer*; 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China, 2018, pp. 876-879, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401168.
- [123] Liu S., Fu C., Zang Y., Zhang S., Li S., Huang Q.: *Analyzing the model of transformer windings under very fast transient overvoltage*; 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018, pp. 272-276, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393781.
- [124] Logakis E., Christen T., Scheel S., **Adamczyk B.**, Qi L., Liu R.: *Oil-to-Gel insulation: A novel eco-efficient insulation concept*; IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), 6th—31st July 2020, Valencia, Spain, pp. 782-785.
- [125] Madarász G., Choi B., Lee J.Y.: *Application of dry-air insulating media in 170kV GIS*; 2011 Electrical Insulation Conference (EIC), Annapolis, MD, USA, 2011, pp. 128-131, doi: 10.1109/EIC.2011.5996131.
- [126] Maekawa S., Ikeda Y.: *Developments in Fuji Large Power Transformers*; Fuji Electric Review, Vol. 11, No. 6, pp. 176-186, 1965.
- [127] Maekawa S., Ohoka N., Hattori S.: *275 kV 230000 kVA „Fahbar” transformer for Higashi Osaka Substation of Kansai Electric Power Co. Inc.*; Fuji Denki Review, Vol. 7, No. 2, pp. 9-13, 1961.
- [128] Maekawa S.: *154 kV 81000 kVA perfectly shielded oscillation-free type “Fahbar” transformers*; Fuji Denki Review, Vol. 2, No. 1, pp. 21- 23, 1956.
- [129] Majer K.: *Wibroakustyka transformatorów*; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2006, s. 227-240; ISBN 83-924481-1-8, 2006.
- [130] Maliszewski A. – prywatna komunikacja z ekspertem.

- [131] Maliszewski A., Mnich M., Wilk M.: Przepięcia przenoszone przez uzwojenia transformatorów energetycznych - pomiary oraz analiza teoretyczna; *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 10/2015, R.91, s. 95-98, ISSN 0033-2097.
- [132] Maliszewski A., Świątkowski M., Dargiel P.: Wybrane zagadnienia pomiarów rozkładu przepięć piorunowych w transformatorach wielkich mocy; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2011*, ISBN 978-83-924841-4-1, 2011, s. 139-158.
- [133] Maliszewski A.: Doświadczenia z pomiarów przepięć piorunowych w uzwojeniach transformatorów; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2013*, ISBN 978-83-924841-2-77, 2013, s. 247-262.
- [134] Maliszewski A.: Kłys P., Daszkiewicz R.: Przepięcia piorunowe w uzwojeniach warstwowych transformatorów rozdzielczych; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2010*, str. 139-158; ISBN 978-83-924841-5-8, 2010.
- [135] Maliszewski A.: Przepięcia piorunowe przenoszone w uzwojeniach transformatorów; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2008*, str. 221-236; ISBN 978-83-924841-8-9, 2008.
- [136] Maliszewski A.: Przepięcia w czterocewce splatanej; *ABB Forum Transformatory Energetyczne*, ISBN 978-83-924841-3-4, 2012, s. 199-216.
- [137] Maliszewski A.: Zjawiska zachodzące w uzwojeniach splatanych i w uzwojeniach z ekranującymi zwojami wplatanymi; *ABB Forum Transformatory Energetyczne*, ISBN 978-83-924841-9-6, 2007, s. 79-96.
- [138] Małecki R., Sikorski Ł.: Nowa interpretacja przebiegów udarowych w transformatorach z uzwojeniami warstwowymi; *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 285, Elektryka*, z. 57; 1978.
- [139] Masdi H., Mariun N., Mohamed A., Wahab N.I.A.: Study of Impulse Voltage Distribution in Transformer Windings; *IEEE Int'l. Conf. Power and Energy (PECon)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 379-383, 2010.
- [140] Masłowski G., Rakov V.A.: Review of recent developments in lightning channel corona sheath research; *Elsevier, Atmospheric Research*, doi:10.1016/j.atmosres.2012.05.028, pp. 117–122, 2013.
- [141] Masłowski G., Ziemia R., Kossowski T.: Overvoltage induced in overhead power lines by nearby lightning stroke; *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94, Nr 2/2018, doi:10.15199/48.2018.02.10.
- [142] Masłowski G.: Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami; *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH*, seria: Rozprawy, Monografie, nr 208, Kraków, 2010.
- [143] McWhirter J.H., Fahrnkopf C.D., Steele J.H.: Determination of Impulse Stresses within Transformer Windings by Computers; *AIEE Trans. on PAS*, Feb. 1957, Vol.75, pp.1267-1274.
- [144] Meador J.R.: Use of Thyrite in power transformers, *Electrical Engineering*, 69(1), 1950, pp. 52; doi: 10.1109/EE.1950.6434099.



- [145] Meshkatodini M.R., Shahmohammadi A., Majidi M., Karami M.: Comparative Study of the Effect of Various Shields on Lightning Electric Field in Power Transformer Windings; IEEE PowerTech, Trondheim, Norway, pp. 1-4, 2011.
- [146] Michalik A., Adamczyk B., Wysocki W., Piasecki W., Banaszczyk J., Smugala D.: Patent EP3544032A1: Electrical device with gel composite insulation, 2018.
- [147] Miki A., Hosoya T., Okuyama, K.: A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings; IEEE Trans., Vol.PAS-97, No. 3, May/June 1978, pp. 930-939.
- [148] Mitolo M., Araneo R.: A Brief History of Maxwell's Equations [History]; IEEE Industry Applications Magazine, vol. 25, no. 3, pp. 8-13, May-June 2019, doi: 10.1109/MIAS.2019.2898096.
- [149] Mosiński F.: Monitorowanie i analiza gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2007, ISBN 978-83-924841-9-6, 2007, s. 97-140.
- [150] Mosiński F.: Problemy izolacji elektrycznej transformatorów HVDC; ABB Forum Transformatory Energetyczne, 15-16 list. 2016, s. 41-80, ISBN 978-83-940283-2-9.
- [151] Mosiński F.: Transformator to newralgiczny element systemu elektroenergetycznego; VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010; s. 261-274.
- [152] Mosiński F.: Transformatory energetyczne z izolacją SF<sub>6</sub>; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2008, s. 23-52, ISBN 978-83-924841-8-9, 2008.
- [153] Mosiński F.: Woda w transformatorze; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2011, ISBN 978-83-924841-4-1, 2011, s. 37-64.
- [154] Mosiński F.: Wytrzymałość elektryczna izolacji transformatorów; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2006, s. 191-208; ISBN 83-924481-1-8, 2006.
- [155] Mosiński F.: Wytrzymałość elektryczna przy napięciu stałym i złożonym ze składową stałą; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2010, s. 159-184; ISBN 978-83-924841-5-8, 2010.
- [156] Murthy A.S., Azis N., Jasni J., Othman M.L., Yousof F., Talib M.: Effect of shield placement for transient voltage mitigation due to switching surges in a 33/11 kV transformer windings; PLoS ONE, vol. 15 (10): e0240368, pp. 1-19, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0240368.
- [157] Niasar M.G., Zhao W.: Impulse voltage distribution on disk winding: calculation of disk series capacitance using analytical method; 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279969.
- [158] Nilanga K.G., Abeywickrama B., Serdyuk Y.V., Gubanski S.: Exploring Possibilities for Characterization of Power Transformer Insulation by Frequency Response Analysis (FRA); IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1375-1382.

- [159] Nitu M.C., Duta M.: Calculation of Surges Transmitted Between Transformer Windings Using the Coupled Circuit Model; 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551475.
- [160] Nowak W.: Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych; Rozprawy i Monografie nr 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
- [161] Nunn T.: A comparison of liquid-filled and dry-type transformer technologies; Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (2000), pp. 105-112 2000 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37047).
- [162] Nuricumbo-Guillén R., Espino-Cortés F.: Dielectric stress distribution in interleaved transformer windings under PWM-type waveforms; 2017 Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, 11 - 14 June 2017, PP. 372 – 375.
- [163] Ohkubo Y., , Katayama H.: A prototype for 500-kV class transformers; Fuji Electric Review, Vol. 12, No.1, pp. 13-22, 1966.
- [164] Okabe S., Koto M., Ueta G., Saida T., Yamada S.: Development of High Frequency Circuit Model for Oil-immersed Power Transformers and its Application for Lightning Surge Analysis; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 2, pp. 541-552, 2011.
- [165] Okubo H., Koshino N., Hayakawa N.: Electrical insulation characteristics of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> gas mixtures under non-uniform electric field; 2003; pp. 538 – 541; 10.1109/CEIDP.2003.1254911.
- [166] Okuyama, K.: A numerical analysis of impulse voltage distribution in transformer windings; Elec. Eng. In Japan, Vol. 87, 1967, Nr. 1, pp. 80-88.
- [167] Olesz M., Haras J.: Diagnostyka stanu technicznego izolatorów przepustowych średniego napięcia; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 2353-1290, Nr 56/2017, s. 67-70; XLII Konferencja Naukowo–Techniczna GDAŃSKIE DNI ELEKTRYKI' 2017 (XLII; 26.10-28.10.2017; Gdańsk, Polska).
- [168] Olesz, M.: Wpływ temperatury warystorowych ograniczników przepięć ZnO na prąd upływowy; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 2353-1290, Nr 39/2014.
- [169] Pająk P.: Analiza narażeń przepięciowych transformatorów energetycznych; Rozprawa doktorska, Wydział EAIiB AGH, Kraków, 2014.
- [170] Pasternak B., Rózga P.: Influence of Dielectric Liquid Type on Partial-Discharge Inception Voltage in Oil-Wedge-Type Insulating System under AC Stress; Energies 2023, 16, 1005; <https://doi.org/10.3390/en16021005>.
- [171] Pedersen A.: On the response of interleaved transformer windings to surge voltages; Trans. AIEE, Vol. 82, 1963, pp. 349-356.
- [172] Piasecki W., Bywalec G., Florkowski M., Fulczyk M., Furgał J.: New approach towards protecting electrical equipment insulation systems against very fast transients; Monography, IEEE Conf. on Elec. Ins. and Diel. Phenom. (CEIDP), 2007, pp. 89 – 94.

- [173] Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Ostrogórska M.: SmartChoke – suppression of transient voltages in industrial applications, transformer life management (TLM); Schering Institut Leibniz Universität, Hannover, 2009.
- [174] Piasecki W., Ostrogórska M., Florkowski M., Fulczyk M., Klys P.: dU/dt protection for distribution transformer; Int. Conf. on Pow. Syst. Trans., IPST'09, Kyoto, Japan, paper no. 151.
- [175] Piotrowski T.: Starzenie się izolacji celulozowej w transformatorze – mechanizmy, skutki, metody i kryteria oceny; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2016, 15-16 listopada 2016, s. 105-134, ISBN 978-83-940283-2-9.
- [176] Piskunov S.A., Mokeev A.V.: Power transformer relay protection with its condition monitoring function; 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9387976.
- [177] PN-EN 60071-1: Koordynacja izolacji. Część 1: Definicja, zasady i reguły.
- [178] PN-EN 60076-3:2002: Transformatory – Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępstwa izolacyjne w powietrzu, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- [179] Pongsathit W., Yutthagowith P., Limcharoen W.: Solid state tesla transformer for flashover test on suspension insulators; 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, Japan, 2017, pp. 239-242, doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088731.
- [180] Popov M., van der Sluis L., Paap G.C., De Herdt H.: Computation of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings; IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp. 1268-1274.
- [181] Popov M., van der Sluis L., Smeets R.P.P., Roldan J.L.: Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 238-247, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881605.
- [182] Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. E. Jezierskiego: Uzwojenia transformatorów energetycznych: Budowa i obliczanie; WNT, Warszawa 1982.
- [183] Pramanik S., Anees S., Satish, L.: Interleaved winding and suppression of natural frequencies; IET Electric Power Applications, 7: 237-244. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2012.0362>.
- [184] Qin Z., Zhang C., Zheng Y., Zhou W., Yang S.: Insulation properties of SF6/N2 gas mixtures under high pressure and low ratio; 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Saskatoon, SK, Canada, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPEC.2017.8286210.
- [185] Quintana J., Walker D., Hunter I.: End of life evaluation of power transformers; 25th International Conference on Electricity Distribution Madrid, 3-6 June 2019; Paper n° 0865.
- [186] Rabins L: Transformer reactance calculations with digital computers; AIEE Transactions, vol. 75, no. 1, pp. 261–267, 1956.

- [187] Ragavan R., Satish L.: An efficient method to compute transfer function of a transformer from its equivalent circuit; *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 780–788, April 2005.
- [188] Rahimpour E., Christian J., Feser K., Mohseni H.: Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings; *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 493–505, April 2003.
- [189] Ren X., Li J., Weng H., Wang R., Xu D.: Design and Testing of a Medium Frequency Transformer; 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Phoenix, AZ, USA, 2021, pp. 1162-1170, doi: 10.1109/APEC42165.2021.9487310.
- [190] Rózga P., Stanek M., Rapp K.: Lightning properties of selected insulating synthetic esters and mineral oil in point-to-sphere electrode system; *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 1699-1705, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007069.
- [191] Rózga P., Stanek M.: Comparative analysis of lightning breakdown voltage of natural ester liquids of different viscosities supported by light emission measurement; *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 2, pp. 991–999, 2017.
- [192] Rózga P.: Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych w polu nierównomiernym przy napięciu udarowym piorunowym – mechanizm i metody badawcze; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2015*, s. 117-164, ISBN 978-83-940283-1-2, 2015.
- [193] Rózga P.: Wytrzymałość elektryczna elementów izolacji stałej transformatorów impregnowanych różnymi cieczami dielektrycznymi; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2016*, 15-16 listopada 2016, s. 135-172, ISBN 978-83-940283-2-9.
- [194] Rózga P.: Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych; *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1/2014, s. 245-247.
- [195] Saied M.M.: The Time and Frequency Response of Shielded Transformer Windings; *Journal of Power Electronics & Power Systems*; ISSN: 2249-863X (online), ISSN: 2321-4244 (print) Volume 4, Issue 2, pp. 33-47; 2014.
- [196] Sekuła R., Kasza K., Płatek R., Rybak A.: Materiałowe i procesowe kierunki badań i rozwoju transformatorów suchych; *ABB Forum Transformatory Energetyczne 2016*, 15-16 listopada 2016, s. 81-104, ISBN 978-83-940283-2-9.
- [197] Senobari R. K., Sadeh J., Borsi H.: Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review; *Electric power systems research* 155 (2018): 172-183.
- [198] SFS 2646 FINNISH STANDARDS: Pole mounted substation, 1987-06-29.
- [199] Shibuya Y., Fujita S., Hosokawa N.: Analysis of very fast transients in transformer windings; *IEE Proceedings on Gener. Transm. Distrib.*, vol. 144, no. 5, pp. 461–468, Sep. 1997.

- [200] Smajic J., Steinmetz T., Ruegg M., Tanasic Z., Obrist R., Tepper J., Weber B., Carlen M.: Simulation and measurement of lightning impulse voltage distributions over transformer windings; IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 50, No.2, pp. 553-556, Feb. 2014.
- [201] Smulko J., Olesz M., Hasse L., Kaczmarek L., Lentka G.: Problems of varistor quality assessment during exploitation; Metrol. Meas. Syst., Vol. XIX (2012), No. 2, pp. 395-404.
- [202] Sobczak W., Kłys P., Claessens M., Grecki F., Aloszko P., Bachorz L., Obrebski K., Czopek M.: Patent WO2018046113A1: A Cover For A Distribution Transformer Filled With A Dielectric Liquid; 2016.
- [203] Sobocki R.: Monitorowanie on-line stanu transformatora – oczekiwanie użytkownika; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2013, ISBN 978-83-924841-2-7, 2013, s. 173-192.
- [204] Soloot A.H., Høidalen H., Gustavsen B.: Influence of the winding design of wind turbine transformers for resonant overvoltage vulnerability, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 2, pp.1250-1257, 2015.
- [205] Sowa P., Macha D.: Transferring signals to the secondary side of the transformers in high voltage unloaded lines; 2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX), Guatemala City, Guatemala, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONCAPANXXXIX47272.2019.8977032.
- [206] Sriyono, Khayam U., Suwarno: Evaluating the Inter-Resonance Characteristics of Various Power Transformer Winding Designs; IEEE Access, vol. 9, pp. 54649–54656, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3070595.
- [207] Stein G.M.: A Study of the Initial Surge Distribution in Concentric Transformer Windings; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, no. 9, pp. 877-893, Sept. 1964, doi: 10.1109/TPAS.1964.4766087.
- [208] Stearn G.F.: Improvements in inductive windings; British Patent No. 587997, 1947.
- [209] Strona internetowa - ABB Sustainability: <https://global.abb/group/en/sustainability>.
- [210] Strona internetowa - EconiQ Hitachi Energy: <https://www.hitachienergy.com/sustainability/econiq>.
- [211] Strona internetowa: [https://sep.com.pl/pdf/inne/Michal\\_Doliwo-Dobrowolski.pdf](https://sep.com.pl/pdf/inne/Michal_Doliwo-Dobrowolski.pdf).
- [212] Strona internetowa: [www.abb.com](http://www.abb.com).
- [213] Strona internetowa: [www.abb.com](http://www.abb.com) - ABB technical brochure: SafePlus AirPlus 24kV - Eco-efficient compact switchgear, 2018.
- [214] Strona internetowa: [www.siemens-energy.com](http://www.siemens-energy.com).
- [215] Su C.Q. (editor): Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings; IGI Global, PA 17033, 2013.
- [216] Tabei B., Ametani A., Gole A.M., Kordi B.: Study of Skin and Proximity Effects of Conductors for MTL-Based Modeling of Power Transformers Using FEM; 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281776.

- [217] Takizawa A., et al.: Development of large capacity low-noise gas-insulated transformer; IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233), New York, NY, USA, 1999, pp. 1036-1041 vol.2, doi: 10.1109/PESW.1999.747340.
- [218] Tavares P., Villibor J., Lopes G., Faria G., Pereira M., Neto E.W.: Evaluation of Vector Fitting Methodology on Distribution Transformers Modelling Based on Lightning Impulse Test Results; 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 331-335, doi: 10.1109/EIC.2018.8480892.
- [219] Theocharis A., Popov M.: Modelling of foil-type transformer windings for computation of terminal impedance and internal voltage propagation; IET Electric Power Applications, Vol. 9, No. 2, pp. 128–137, 2015.
- [220] Thiede A., Kaltenborn U., Hensel M.: Field Diagnosis on Transformers for Wind Turbine Applications; 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 554-558, doi: 10.1109/GTDAsia.2019.8715937.
- [221] Tomczuk B., Koterak D.: Transformatory z rdzeniami amorficznymi – doświadczenia technologiczne i obliczeniowe; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2009, s. 15-48, ISBN 978-83-924841-6-5, 2009.
- [222] Toshiaki R., Yagihashi Y., Endo F., Oomori T.: Fundamental insulation characteristics of air, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, and SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gases; Electrical Engineering in Japan, 2005; vol. 155, pp. 9 – 17; 10.1002/ej.20348.
- [223] Transformer Handbook, ABB, 2004.
- [224] Trela K. Gawrylczyk K.M.: FEM Modelling of the Influence of the Remaining Windings on the Frequency Response of the Power Transformer; Applied Sciences 10, no. 21: 7633, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10217633>.
- [225] Trkulja B., Drandić A., Milardić V., Žiger I.: Evaluation of Methodology for Lightning Impulse Voltage Distribution over High-Voltage Windings of Inductive Voltage Transformers; Energies 2021; 14(16):5144. <https://doi.org/10.3390/en14165144>.
- [226] Tsukao S., Oue Y., Hasegawa Y.: Application of gas insulated transformers to underground substations in Japan; IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002, pp. 517-521 vol.1, doi: 10.1109/TDC.2002.1178440.
- [227] Vahdi B., Eslamian M., Hosseinian S. H.: Transient simulation of cast-resin dry-type transformers using FEM; European Transactions on Electrical Power; 21. 363 - 379. 10.1002/etep.447; 2011.
- [228] van Nuys R.: Interleaved high voltage transformer windings; IEEE Trans. Of Pow. App. And Sys., Vol. 79, No. 5, 1978, pp. 1946-1954.
- [229] Virtanen E., Akdag A.: Power below the waves – Transformers at depths of 3 km; ABB Review Special Report: Transformers, pp. 33-36, November 2012.

- [230] Wahyudi M.S., Setiabudy R.: Impulse Voltage Distribution in Countershielded Disc VS Interleaved Disc Windings on 500 kV Power Transformer Design; *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 12, 31-38; 2020; doi: 10.17706/ijcee.2020.12.1.31-38.
- [231] Waldvogel P., Rouxel R.: Predetermination by calculation of electric stresses in a winding subjected to a surge voltage; *Proc. CIGRE*, 1956, Paper No. 126.
- [232] Wang Y., et al.: Development of a Portable SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gas Charging Device for On-site Modification of Gas Insulated Current Transformer; 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Nangjing, China, 2022, pp. 1583-1587, doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846512.
- [233] Wen-Rong S., et al.: Simulation Analysis of Partial Discharge Signal Propagation in Transformer; 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Weihai, China, 2020, pp. 1035-1040, doi: 10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208592.
- [234] Wilcox D., Conlon M., Hurley W.: Calculation of self and mutual impedances for coils on ferromagnetic cores; in *Science, Measurement and Technology*, IEE Proceedings A, vol. 135, no. 7, 1988, pp. 470–476.
- [235] Wilcox D., Hurley W., Conlon M.: Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings; in *Generation, Transmission and Distribution* [see also IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution], IEE Proceedings C, vol. 136, no. 5, 1989, pp. 308–314.
- [236] Wira A., Zybert R.: *Laboratorium z inżynierii wysokonapięciowej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003.
- [237] Witczak P.: *Obliczenia akustyczne transformatora*; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2011, ISBN 978-83-924841-4-1, 2011, s. 187-198.
- [238] Woźniak P., Ketner A., Świątkowski M.: *Ekologiczne transformatory energetyczne z estrem syntetycznym Midel 7131*; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2011, ISBN 978-83-924841-4-1, 2011, s. 159-186.
- [239] Wrocławski J.: *Nowoczesne transformatory rozdzielcze z suchą izolacją*; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2014, s. 27-76, ISBN 978-83-924841-0-3, 2014.
- [240] Wrocławski J.: *Straty mocy w transformatorach rozdzielczych*; ABB Forum Transformatory Energetyczne, 13-14 listopada 2012, s.167-198, ISBN 978-83-924841-3-4.
- [241] Yamamoto H: Equivalent circuit and oscillation of potential of neutral point of star-connected transformer winding of cylindrical-layer type; *Fuji Denki Review*, Vol. 2, No. 4, pp. 103-109, 1956.
- [242] Yangjue H., et al.: Design of 10kV Dry Transformer Monitoring and Control System; 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, 2021, pp. 85-88, doi: 10.1109/AEEES51875.2021.9402993.

- [243] Yao W., Parveen T., Lu J.; Seagar A.: Modular High-Frequency High-Power Transformers for Offshore Wind Turbines; 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Brisbane, Australia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715592.
- [244] Youhua J., Hong Y., Erzhi W., Yundong C.: High frequency model and transient response of transformer windings; in IEEE/PES Asia Pacific Trans-mission and Distribution Conference and Exhibition 2002, vol. 3, 2002, pp. 1839–1844.
- [245] Yousof M. F.M., Ekanayake C., Saha T. K., Ma H.: A Study on Suitability of Different Transformer Winding Models for Frequency Response Analysis; Proceedings of IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 26-29, 2012, pp. 1-8.
- [246] Yousof M. F. M.: Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring; PhD Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, 2015.
- [247] Yuezhong L., Xiaoqiang Y., Piao Xia Z.: Research on On-Line Monitoring and Fault Recognition Technology of Intelligent Power Transformer Based on the Internet; 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2018, pp. 4227-4231, doi: 10.1109/CAC.2018.8623269.
- [248] Zakrzewski K.: Od śmiałej hipotezy do współczesnych transformatorów wielkich mocy; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2015, s. 29-44, ISBN 978-83-940283-1-2, 2015.
- [249] Zakrzewski K.: Rozwój konstrukcji rdzeni transformatorów energetycznych; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2010, s. 81-98; ISBN 978-83-924841-5-8, 2010.
- [250] Zakrzewski K.: Straty dodatkowe poza uzwojeniami w elementach konstrukcyjnych transformatora; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2013, ISBN 978-83-924841-2-7, 2013, s. 157-172.
- [251] Zakrzewski K.: Straty mocy w transformatorze; ABB Forum Transformatory Energetyczne 2014, s. 117-136, ISBN 978-83-924841-0-3, 2014.
- [252] Zakrzewski K.: Zjawisko nadprzewodnictwa i jego zastosowanie w transformatorach; ABB Forum Transformatory Energetyczne, 18-19 listopada 2008, s. 53-76, ISBN 978-83-924841-8-9.
- [253] Zakrzewski K.: Transformatory największych mocy i napięć – problematyka technologiczna i badawcza; Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 83/2009.
- [254] Zhao X., Yao C., Zhao Z., Abu-Siada A.: Performance evaluation of online transformer internal fault detection based on transient overvoltage signals; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, pp. 3906-3915, Dec. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006772.
- [255] Zhou Z., et al.: Validity Evaluation Method of DGA Monitoring Sensor in Power Transformer Based on Chaos Theory; 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Cancun, Mexico, 2018, pp. 402-405, doi: 10.1109/CEIDP.2018.854485.



- [256] Zmarzly D., Boczar T., Fracz P., Borucki S.: High voltage power transformer diagnostics using vibroacoustic method; 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Santa Fe, NM, USA, 2014, pp. 561-564, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287337.
- [257] Zupan T, Trkulja B., Stih Z.: Power transformer winding model for lightning impulse testing; *Procedia Engineering*, Volume 202, 2017, Pages 297-304, ISSN 1877-7058.