

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

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki



**Analiza narażeń przepięciowych
transformatorów energetycznych**

Analysis of overvoltage risks of power transformers

mgr inż. Piotr Pająk

Rozprawa doktorska

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

Kraków, 2014

Spis treści

1. Wprowadzenie, cel i zakres pracy	3
2. Narazenia transformatorów od przepięć piorunowych	4
3. Analiza narażeń transformatorów od przepięć łączeniowych w układach z wyłącznikami próżniowymi	5
4. Badania eksperymentalne i modelowanie zjawisk przepięciowych podczas wyłączania transformatorów jednofazowych wyłącznikami próżniowymi	6
4.1. Badania przepięć łączeniowych w układzie jednofazowym	6
4.2. Badania przepięć podczas wyłączania transformatorów trójfazowych	8
4.3. Symulacje przebiegów przepięć podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi	11
5. Analiza narażeń przepięciowych układów izolacyjnych wewnętrznych uzwojeń transformatorów	12
5.1. Badania rozkładów przepięć narażających układy izolacyjne wewnętrzne uzwojeń transformatorów	12
5.2. Symulacje przepięć wewnętrznych w uzwojeniach transformatorów	15
6. Analiza porównawcza narażeń przepięciowych transformatorów podczas prób napięciowych i w warunkach eksploatacji	16
6.1. Badania przepięć w transformatorze podczas prób napięciem udarowym piorunowym	16
6.2. Badania przepięć w transformatorze podczas działania udarów modelujących przepięcia w układach elektroenergetycznych	16
6.3. Analiza porównawcza wartości maksymalnych przepięć w transformatorze podczas prób napięciem udarowym piorunowym i w warunkach eksploatacji	18
7. Podsumowanie	20
Literatura	20

1. Wprowadzenie, cel i zakres pracy

Ciągłe dążenie do zwiększania niezawodności dostaw energii elektrycznej powoduje, że szczególnie uwaga zwracana jest na takie rozwiązania układów elektroenergetycznych, które do minimum ograniczają prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Dlatego jednym z podstawowych zadań, realizowanych w elektroenergetyce, jest zapewnienie niezawodności pracy układów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Duży wpływ na ciągłość pracy układów elektroenergetycznych ma niezawodność transformatorów. Zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających utrzymanie odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej ich układów izolacyjnych, wynikającej ze spodziewanych narażeń, ma podstawowe znaczenie dla spełnienia tych wymagań. Występujące równocześnie czynniki ekonomiczne i techniczne powodują konieczność obniżania zapasu wytrzymałości elektrycznej urządzeń. Wynika stąd konieczność optymalizacji rozwiązań technicznych transformatorów. Wymaga to szczegółowej analizy narażeń przepięciowych występujących w warunkach eksploatacji oraz podczas prób napięciowych. W warunkach eksploatacji można w niej wyróżnić trzy grupy związane z rodzajem czynnika zewnętrznego, powodującego przepięcie w układach elektroenergetycznych:

- przepięcia będące efektem wyładowań piorunowych,
- przepięcia powodowane zjawiskami towarzyszącymi operacjom łączeniowym,
- przepięcia podczas stanów awaryjnych w eksploatacji urządzeń elektrycznych.

Podczas prób napięciowych źródłem przepięć narażających wysokonapięciowe układy izolacyjne zewnętrzne i wewnętrzne są:

- udary napięciowe piorunowe,
- udary napięciowe łączeniowe,

stosowane zależnie od napięcia znamionowego urządzenia.

W warunkach eksploatacji transformatory są poddawane działaniu przepięć o zróżnicowanych przebiegach i wartościach maksymalnych. Obecnie, z powodu stosowania w układach elektroenergetycznych nowych urządzeń o parametrach odmiennych od parametrów urządzeń stosowanych dotychczas, takich jak na przykład wyłączniki próżniowe lub też zasilacze impulsowe maszyn elektrycznych, układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych są narażone na oddziaływanie przepięć nie występujących do tej pory. Przepięcia narażają układy izolacyjne zewnętrzne transformatorów oraz są źródłem przepięć wewnątrz uzwojeń.

Transformatory energetyczne chronione są od przepięć głównie przez zastosowanie bezskiernikowych ograniczników z tlenków metali. Zastosowanie tej metody nie rozwiązało jednak całkowicie problemów związanych z ochroną przepięciową. Z analizy literatury wynika, że ochrona przepięciowa transformatorów energetycznych może być nieskuteczna. Wiele transformatorów uległo bowiem uszkodzeniom w wyniku oddziaływania przepięć w warunkach eksploatacji pomimo, że transformatory przeszły znormalizowane próby napięciowe z wynikiem pozytywnym i były chronione z zastosowaniem ograniczników przepięć [1-9].

W celu oceny skutków narażeń układów izolacyjnych transformatorów niezbędna jest analiza rozkładów napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń przy oddziaływaniu przepięć o zróżnicowanych przebiegach w warunkach eksploatacji oraz podczas prób napięciowych. Do tej grupy problemów wpisuje się rozprawa doktorska, stanowiąca rozszerzenie wiedzy w zakresie przepięć narażających układy izolacyjne transformatorów energetycznych i ochrony przepięciowej.

Teza rozprawy doktorskiej jest następująca:

- ocena skutków narażeń przepięciowych transformatorów energetycznych w eksploatacji wymaga szczegółowej analizy reakcji transformatorów na

przebiegów w układach elektroenergetycznych, prowadzonej na podstawie badań i obliczeń, z uwzględnieniem warunków pracy transformatorów,

- wymagane jest rozszerzenie badań oddziaływania narażeń napięciowych na układy izolacyjne transformatorów w celu rozpoznania możliwości zwiększenia skuteczności ochrony w warunkach eksploatacji.

W celu potwierdzenia tezy wykonano badania eksperymentalne i symulacje komputerowe narażeń napięciowych układów izolacyjnych zewnętrznych i wewnętrznych (tj. uzwojeń) transformatorów energetycznych występujących:

- w warunkach eksploatacji,
- podczas prób napięciowych.

Zakres rozprawy doktorskiej obejmuje:

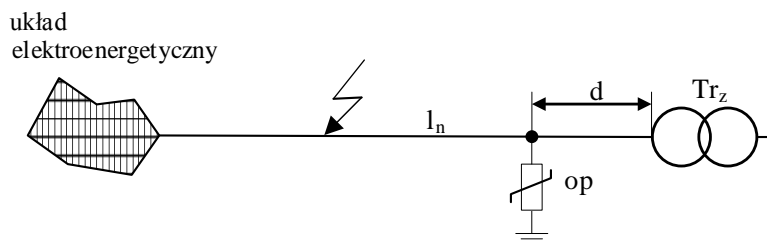
- charakterystykę napięć powstających w układach elektroenergetycznych i układów ochrony napięciowej transformatorów energetycznych,
- analizę narażeń napięciowych transformatorów energetycznych od napięć piorunowych,
- analizę specyficznych właściwości i parametrów wyłączników próżniowych powodujących powstawanie napięć łączeniowych o nietypowych przebiegach,
- badania napięć narażających układy izolacyjne transformatorów od napięć łączeniowych w układach z wyłącznikami próżniowymi,
- symulacje napięć powstających podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi,
- badania napięć narażających układy izolacyjne wewnętrzne uzwojeń transformatorów o zróżnicowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych i parametrach elektrycznych, występujących podczas oddziaływania udarów napięciowych o przebiegach odzwierciedlających napięcia powstające w układach elektroenergetycznych,
- symulacje napięć wewnętrznych w uzwojeniach transformatora rozdzielczego,
- badania narażeń napięciowych układów izolacyjnych transformatorów podczas prób napięciowych i w warunkach eksploatacji.

2. Narażenia transformatorów od napięć piorunowych

Napięcia piorunowe są skutkiem wyładowań atmosferycznych do przewodów odgromowych, przewodów fazowych linii napowietrznych lub podczas wyładowań doziemnych w otoczeniu linii przesyłowych.

Wykonano symulacje napięć powstających podczas wyładowań piorunowych narażających transformator pracujący w układzie, stanowiącym fragment sieci elektrycznej rozdzielczej (Rys. 1). Układ zawiera:

- transformator rozdzielczy Tr_z o mocy 250 kVA i napięciu znamionowym 15/0,4 kV,
- linię napowietrzną l_n zasilającą transformator Tr_z ,
- trzy ograniczniki napięć op , chroniące transformator Tr_z [10].

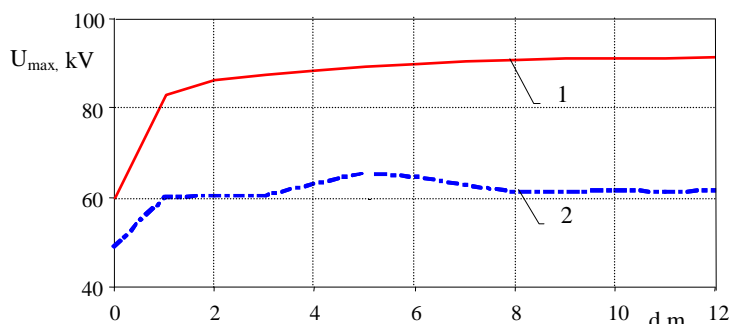


Rys.1. Schemat fragmentu sieci rozdzielczej: l_n – linia napowietrzna, op – ograniczniki napięć z tlenków metali, Tr_z – transformator rozdzielczy, d – odległość między punktem zainstalowania ograniczników napięć a transformatorem

Model cyfrowy fragmentu sieci, opracowano w programie *EMTP-ATP*. Symulacje obejmowały przebiegi przepięć doziemnych na zaciskach transformatora Tr_z wykonane przy następujących założeniach:

- wartość szczytowa udaru prądowego piorunowego wynosi 20 kA,
- wyładowanie atmosferyczne następuje do przewodu fazowego linii napowietrznej l_n w odległości 100 m od transformatora,
- sieć pracuje z punktem neutralnym izolowanym od ziemi (ograniczniki przepięć: $U_c = 18$ kV) lub z punktem neutralnym połączonym z ziemią przez rezystor (ograniczniki przepięć: $U_c = 12$ kV).

Na podstawie wyników symulacji przebiegów przepięć doziemnych na zaciskach transformatora (wyznaczono zależności wartości maksymalnych napięć doziemnych w jednej fazie, od odległości d między ogranicznikami a chronionym transformatorem i przedstawiono na rysunku 2.



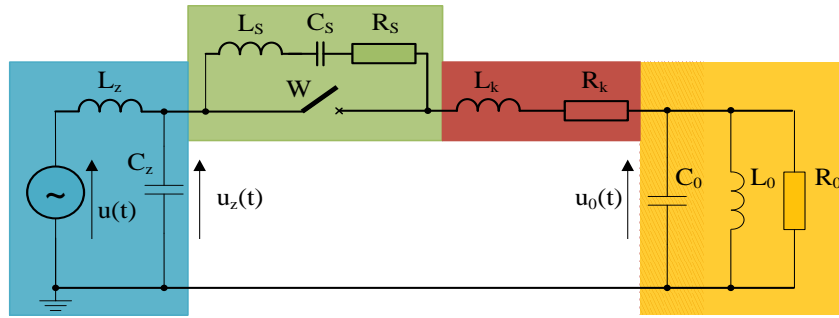
Rys. 2. Zależności wartości maksymalnych napięć doziemnych na zaciskach transformatora rozdzielczego 15 kV od odległości między ogranicznikami przepięć a transformatorem $U_{max}=f(d)$: 1 – sieć z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, 2 – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

Wyniki symulacji przepięć piorunowych, wykazały że:

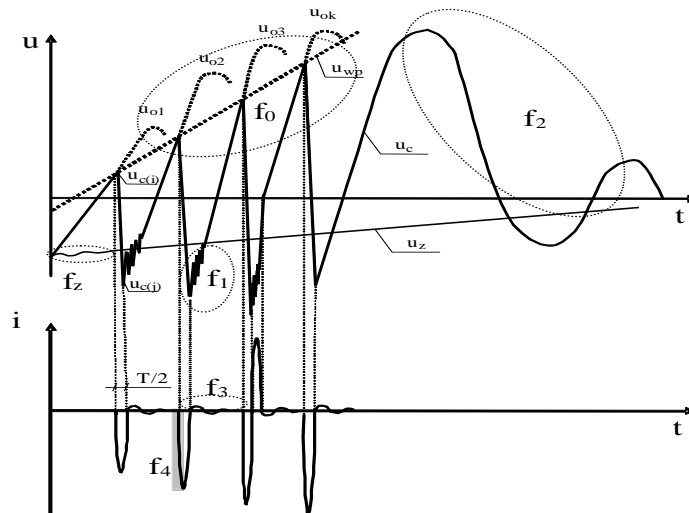
- wartości maksymalne napięć przejściowych na transformatorach chronionych ogranicznikami przepięć, pracujących w sieciach elektrycznych z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, są większe od wartości maksymalnych napięć przejściowych na transformatorach pracujących w sieciach z punktem uziemionym przez rezystor,
- zwiększenie odległości między punktem zainstalowania ograniczników przepięć a zaciskami transformatora powoduje zwiększenie wartości maksymalnych napięć narażających transformator podczas wyładowań piorunowych.

3. Analiza narażeń transformatorów od przepięć łączeniowych w układach z wyłącznikami próżniowymi

Badania narażeń transformatorów od przepięć łączeniowych koncentrowały się na narażeniach przepięciowych powstających podczas łączenia transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Specyfika zjawisk występujących podczas palenia łuku w próżni powoduje, że przebieg procesu wyłączania urządzeń przy użyciu wyłączników próżniowych jest odmienny od przebiegów procesów wyłączania za pomocą innych wyłączników, ze względu na zdolność do ucinania prądu i dużą wytrzymałość powrotnej przerwy międzystykowej [11-14].



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu z transformatorem jednofazowym ($L_0C_0R_0$) do analizy przebiegów napięć podczas wyłączania transformatora wyłącznikiem próżniowym: $u_z(t)$ – napięcie zasilania, $u_0(t)$ – napięcie na odbiorniku, L_z, C_z – indukcyjność i pojemność sieci zasilającej, W – wyłącznik próżniowy, L_k, R_k – indukcyjność i rezystancja linii kablowej, C_0 – suma pojemności linii kablowej i odbiornika, L_0, R_0 – indukcyjność i rezystancja odbiornika, L_s, R_s, C_s – indukcyjność, rezystancja i pojemność zastępcza przerwy między stykami wyłącznika próżniowego [14]



Rys. 4. Typowy przebieg napięcia powrotnego podczas wyłączania urządzenia o charakterze indukcyjnym za pomocą wyłącznika próżniowego: u_o – napięcie na wyłączonym odbiorniku bez przeskoków powtórnych w wyłączniku, u_c – napięcie na odbiorniku (na pojemności C_0 – Rys. 3) wyłączonym wyłącznikiem próżniowym z przeskokami powtórными, u_z – napięcie zasilania, i – prąd łącznika próżniowego, T – czas palenia się łuku w komorze wyłącznika, f_0, f_1, f_2 – częstotliwości składowych przejściowych napięcia na odbiorniku po wyłączeniu, f_3, f_4 – częstotliwości składowych przejściowych prądu wyłącznika, t – czas [15]

Przebieg napięcia powrotnego, pojawiający się między stykami wyłącznika próżniowego bezpośrednio po ucięciu prądu, zawiera typowe składowe przejściowe o różnych częstotliwościach f_1 i f_2 (Rys. 4) [15].

4. Badania eksperymentalne i modelowanie zjawisk przejściowych podczas wyłączania transformatorów jednofazowych wyłącznikami próżniowymi

4.1. Badania napięć łączeniowych w układzie jednofazowym

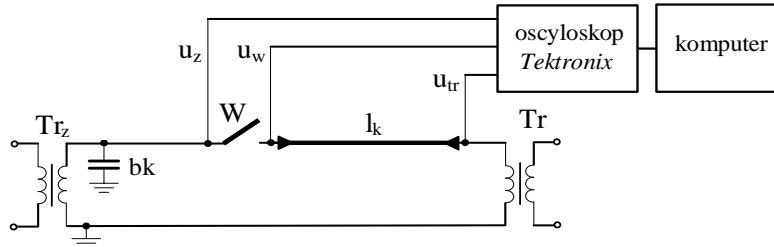
Przeprowadzono badania eksperymentalne dla oceny wpływu konfiguracji układu elektrycznego na:

- przebiegi napięć na zaciskach wyłączanego transformatora,
- częstotliwości f_0, f_1 i f_2 (Rys. 4) składowych przebiegów napięć,
- wartości maksymalne napięć narażających układ izolacyjny transformatora podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym.

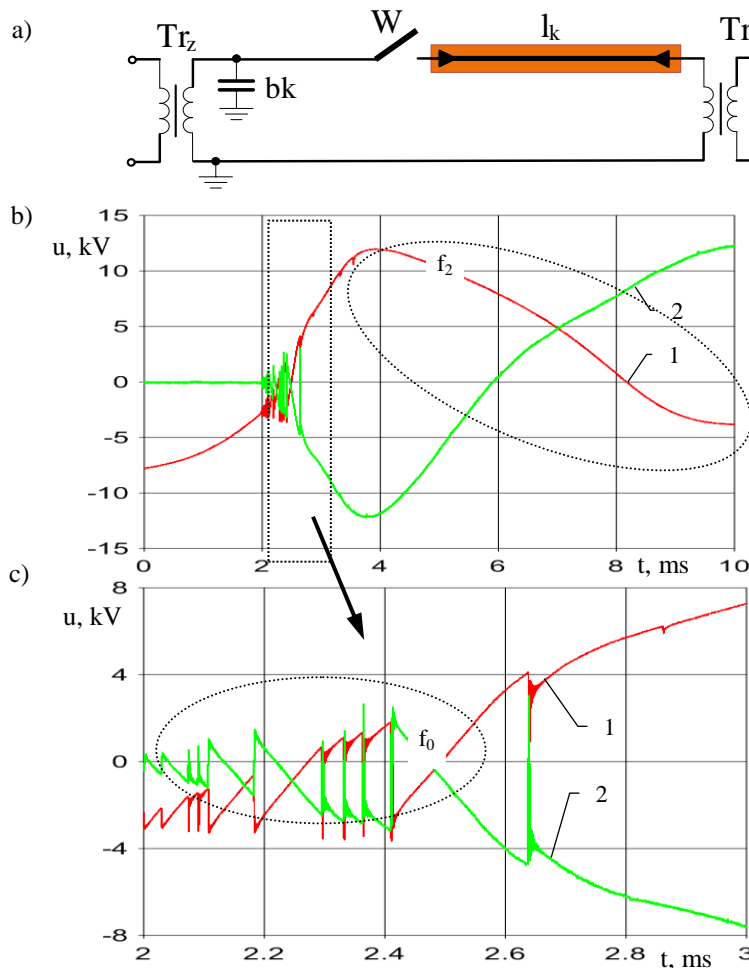
Program badań obejmował rejestrację:

- przebiegów napięć przejściowych fazowych na zaciskach wyłączanego transformatora Tr ,
- charakterystyk częstotliwościowych impedancji układu,

przy czym, w celu eliminacji wpływu napięć i prądów w sąsiednich fazach transformatora wyłączanego, badania wykonano w układzie jednofazowym. Wyniki rejestracji przebiegów zamieszczono na rysunku 6.

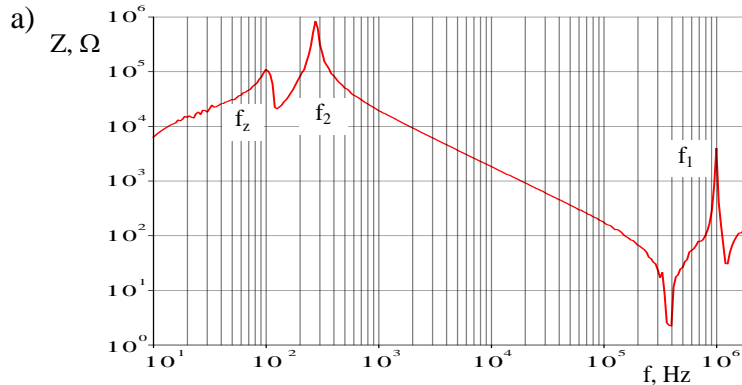


Rys. 5. Schemat stanowiska do badań przebiegów napięć podczas wyłączania transformatora w układzie jednofazowym: Tr_z – transformator zasilający typu 250 kVA, 15/0,4 kV, l_k – kabel typu RG-213U MIL.C 17/D o długości 90 m, W – wyłącznik próżniowy typu VD4, Tr – transformator wyłączany typu TOC 20/10, bk – bateria kondensatorów 60 nF; u_z – napięcie zasilające, u_w – napięcie doziemne na zaciskach wyłącznika, u_{tr} – napięcie doziemne na transformatorze



Rys. 6. Przebiegi napięcia przejściowego fazowego u_{tr} na zaciskach transformatora Tr i napięcia $\Delta u = u_z - u_w$ między stykami wyłącznika W w układzie przedstawionym na rysunku 5: a) schemat układu, b) przebiegi napięć w czasie 10 ms, c) fragmenty przebiegów napięć z rysunku 6b w przedziale 2 ms – 3 ms; 1 – napięcie fazowe u_{tr} na transformatorze Tr , 2 – napięcie $\Delta u = u_z - u_w$ między stykami wyłącznika próżniowego W

Badania przeprowadzone w etapie II obejmowały rejestrację charakterystyk częstotliwościowych impedancji $Z=g(f)$ układu (Rys. 7). Na podstawie wyników badań wyznaczono częstotliwości własne układu (tabela 1).



Rys. 7. Zależności $Z = g(f)$ układu jednofazowego z transformatorem i wyłącznikiem próżniowym (Rys. 5)

Wykonano także obliczenia częstotliwości składowych przejściowych przebiegów powstających na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym zamieszczonym na rysunku 5. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1: Częstotliwości składowych przejściowych przebiegów napięć na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym w układzie z rysunku 5

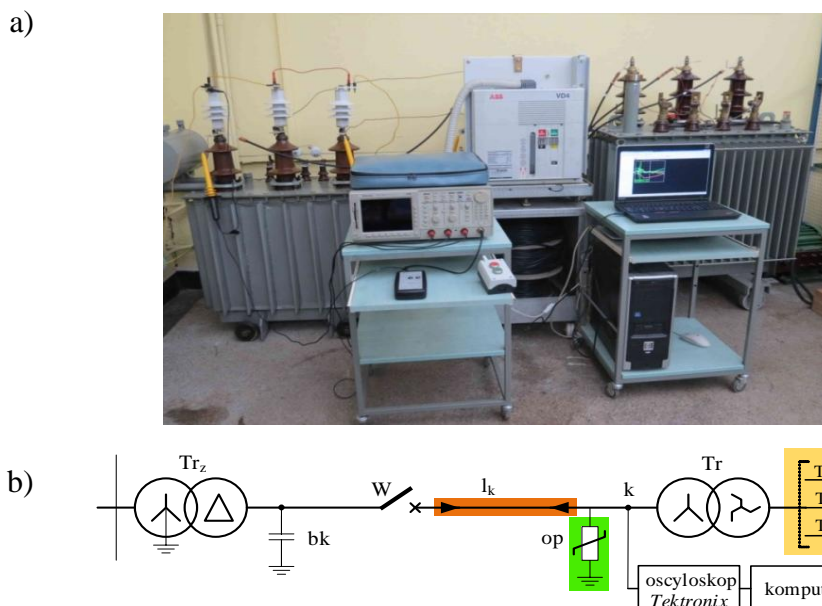
częstotliwość	częstotliwości wyznaczone z przebiegów $u=f(t)$ (Rys. 6)	częstotliwości wyznaczone z zależności $Z=g(f)$ (Rys. 7)	Częstotliwości obliczone
f_0	15 kHz - 60 kHz	–	–
f_1	0,99 MHz	1 MHz	2,38 MHz
f_2	100 Hz	281 Hz	330 Hz
f_z	–	112 Hz	150 Hz

Badania wykonano także dla układu, w którym transformator wyłączany był połączony bezpośrednio z wyłącznikiem próżniowym. Z badań napięć narażających układ izolacyjny transformatora przeprowadzonych w układzie jednofazowym wynika, że podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi powstają napięcia o różnych przebiegach i wartościach maksymalnych, zależnych od przebiegu zjawisk przejściowych w komorach wyłączników i w układach elektrycznych z transformatorami współpracującymi z wyłącznikami.

4.2. Badania napięć podczas wyłączania transformatorów trójfazowych

Przeprowadzono badania napięć podczas wyłączania transformatorów trójfazowych wyłącznikami próżniowymi. Stanowisko doświadczalne, przedstawione na rysunku 8, odwzorowuje typowy fragment sieci elektrycznych średniego napięcia. Stanowisko zawiera:

- transformator zasilający Tr_z 250 kVA, 15/0,4 kV,
- transformator doświadczalny Tr typu TOC 20/10 20 kVA 6/0,4 kV,
- kabel l_k typu RG – 213U MIL.C 17/D o długości 90 m,
- wyłącznik próżniowy W typu VD4,
- ograniczniki napięć typu POLIM – D 10 stanowiące ochronę napięciową transformatora Tr ,
- baterię kondensatorów bk o pojemności 0,5 μ F,
- transformatory jednofazowe typu $TrCA$ stanowiące obciążenie transformatora doświadczalnego Tr .



Rys. 8. Stanowisko do badań napięć podczas łączenia transformatora wyłącznikiem próżniowym:
 a) widok stanowiska, b) schemat stanowiska; Tr_z – transformator zasilający, Tr – transformator wyłączany, l_k – kabel, W – wyłącznik próżniowy, op – ograniczniki napięć, bk – bateria kondensatorów, T_o – transformatory jednofazowe obciążające

Badania napięć wykonano:

- w stanie pracy jałowej transformatora doświadczalnego Tr ,
- dla transformatora Tr obciążonego (obciążenie stanowiły trzy transformatory jednofazowe typu $TrCA$, pracujące w stanie jałowym).

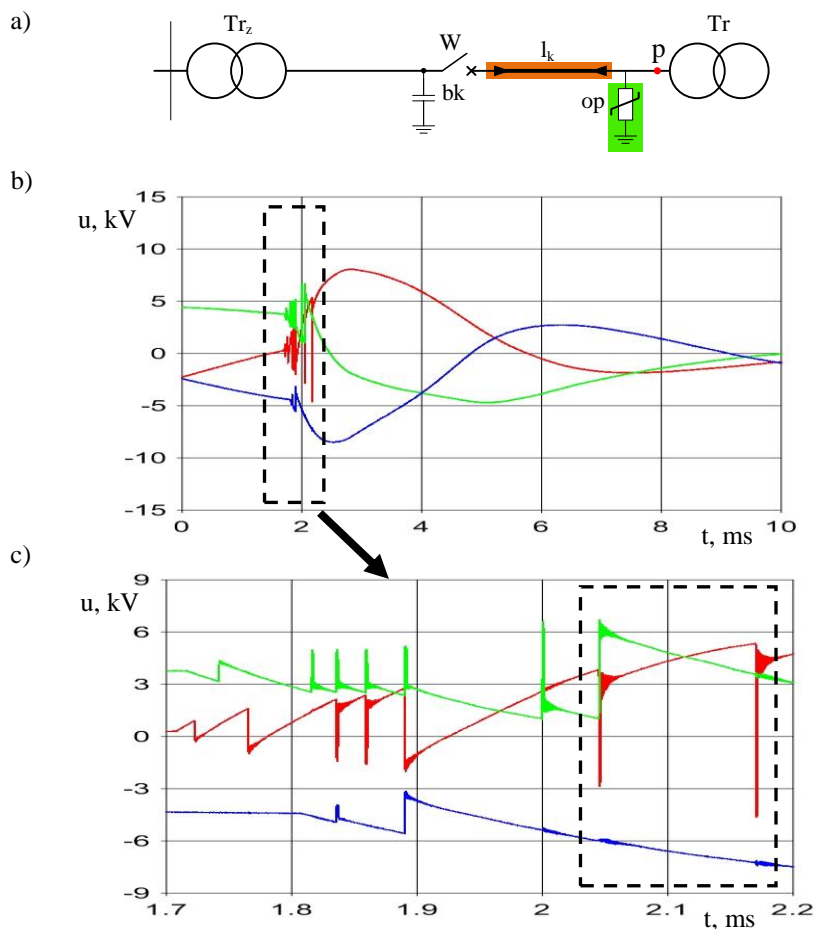
Program badań obejmował rejestrację napięć doziemnych, powstających na zaciskach transformatora Tr podczas wyłączania transformatora. Badania napięć łączeniowych wykonano w układach o następujących konfiguracjach:

- transformator Tr chroniony ogranicznikami napięć,
- transformator bez ochrony napięciowej,
 - transformator bez obciążenia,
 - transformator obciążony transformatorami jednofazowymi T_o ,
 - transformator połączony z wyłącznikiem kablem l_k ,
 - transformator połączony bezpośrednio z wyłącznikiem.

Celem badań było:

- wyznaczenie wpływu ograniczników z tlenków metali, stosowanych do ochrony napięciowej transformatora na przebiegi i wartości maksymalne napięć podczas wyłączania transformatora wyłącznikami próżniowymi,
- określenie wpływu kabla łączącego transformator z wyłącznikiem na napięcia łączeniowe,
- określenie wpływu obciążenia na napięcia podczas wyłączania transformatora.

Wybrane przebiegi napięć przejściowych fazowych na zaciskach transformatora Tr wyłączanego wyłącznikiem próżniowym zamieszczono na rysunku 9.



Rys. 9. Przebiegi napięć przejściowych fazowych na zaciskach transformatora Tr wyłączanego wyłącznikiem próżniowym: a) schemat układu (p – punkt rejestracji napięć), b) przebiegi napięć w czasie 10 ms, c – fragmenty przebiegów napięć z rysunku 9b w przedziale 1,7 ms – 2,2 ms, (transformator Tr chroniony ogranicznikami, połączony z wyłącznikiem kablem, bez obciążenia)

Wartości maksymalne napięć doziemnych na zaciskach transformatora Tr 20 kVA podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości maksymalne napięć doziemnych na zaciskach transformatora Tr 20 kVA podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym

układ połączeń		transformator chroniony ogranicznikami				transformator bez ochrony			
		transformator bez obciążenia		transformator obciążony		transformator bez obciążenia		transformator obciążony	
		połączenie transformatora z wyłącznikiem							
		kabel	bezpośrednie	kabel	bezpośrednie	kabel	bezpośrednie	kabel	bezpośrednie
U_{max}	kV	8	9,5	7,4	9,9	8,1	9,3	8	9,4
$k_p = \frac{U_{max}}{U_s \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}$	-	1,36	1,62	1,26	1,32	1,38	1,58	1,36	1,6

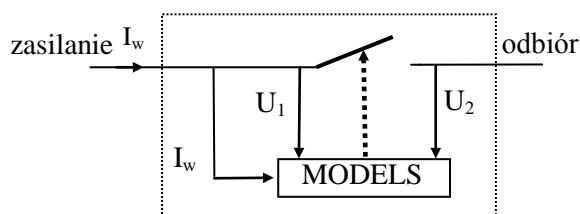
W tabeli zastosowano następujące oznaczenia: k_p – współczynnik przebiecia, U_{max} – wartość maksymalna napięcia przejściowego, U_s – największe napięcie sieci

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przebiegi przepięć powstających podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi, zawierają składowe oscylacyjne wynikające głównie z wielokrotnych przeskoków między

otwierającymi się stykami wyłącznika oraz ze zjawiska wielokrotnych odbić fal napięciowych od końców kabla łączącego transformator z wyłącznikiem próżniowym. Beziskernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali, stosowane do ochrony przepięciowej transformatorów energetycznych, nie zmniejszają przepięć łączeniowych o wartościach maksymalnych mniejszych od poziomu ochrony ograniczników i nie mają zasadniczego wpływu na przebiegi składowych oscylacyjnych takich przepięć. Częstotliwości składowych przebiegów przepięć zmieniają się w szerokich granicach od kilku do kilkuset kiloherców i są zależne głównie od zjawisk przejściowych w układzie wyłącznik-kabel-transformator wyłączany.

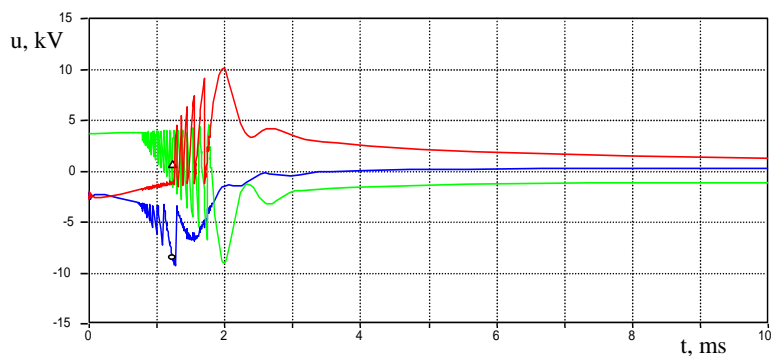
4.3. Symulacje przebiegów przepięć podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi

Do symulacji przepięć powstających podczas wyłączania transformatora wyłącznikami próżniowymi w układzie doświadczalnym przedstawionym na rysunku 8 zastosowano model wyłączników próżniowych uwzględniający napięcie przeskoku między otwierającymi się stykami wyłącznika (Rys. 10) [11,15].



Rys.10. Model cyfrowy wyłączników próżniowych

Model ma postać idealnego wyłącznika, zamykającego się w momencie, gdy napięcie między stykami jest większe od napięcia przeskoku w komorach próżniowych, a otwierającego się w momencie, gdy płynący prąd jest mniejszy od prądu ucięcia. Model opracowano w środowisku programowania *MODELS*, będącym wewnętrznym środowiskiem programowania *EMTP – ATP* [16,17].



Rys.11. Wyniki symulacji napięć przejściowych doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora Tr 20 kVA, pracującego w stanie jałowym, wyłączanego wyłącznikiem próżniowym, w układzie doświadczalnym pokazanym na rysunku 8

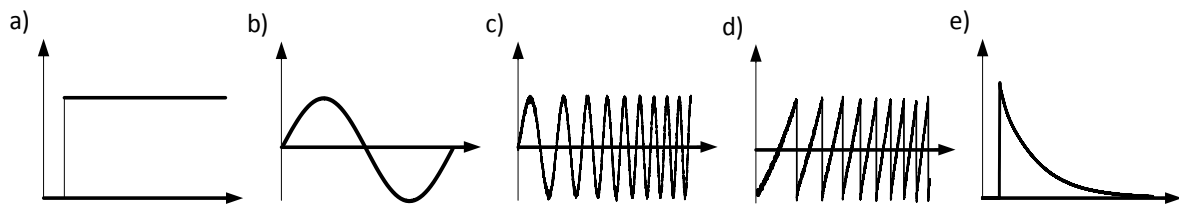
Charakter przebiegów napięć doziemnych powstających podczas wyłączania transformatorów, uzyskanych w wyniku symulacji oraz ich wartości maksymalne, zbliżone są do wyników doświadczalnych (rys. 9b).

5. Analiza narażeń przepięciowych układów izolacyjnych wewnętrznych uzwojeń transformatorów

5.1. Badania rozkładów napięć narażających układy izolacyjne wewnętrzne uzwojeń transformatorów

Przebiegi pojawiające się na zaciskach wejściowych transformatorów są źródłem napięć wewnętrznych, narażających układy izolacyjne uzwojeń. Przebiegi przepięciowe w uzwojeniach zależą od reakcji transformatorów na przepięcia zewnętrzne [4,18-20].

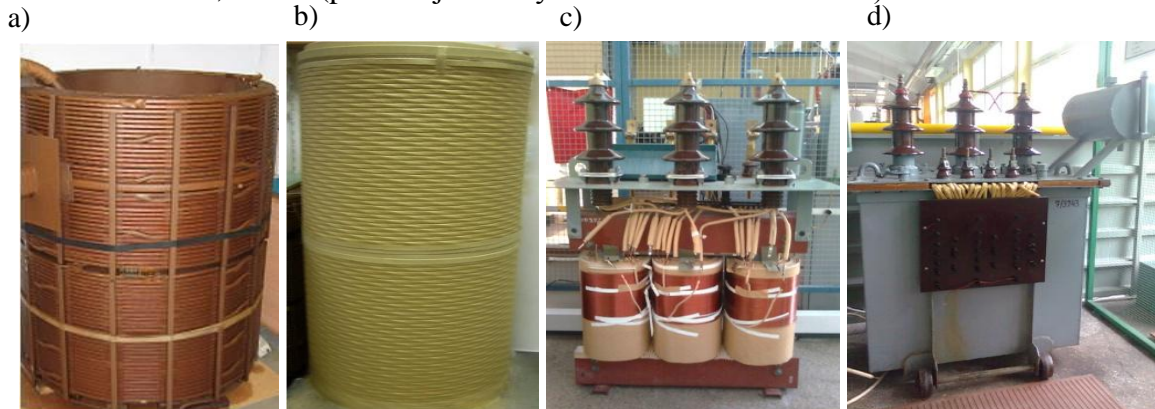
Program badań obejmował rejestracje przebiegów napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń, transformatorów i charakterystyk częstotliwościowych napięć w uzwojeniach. Przebiegi napięć powstających w układach elektroenergetycznych modelowano przez zastosowanie udaru napięciowego prostokątnego, napięcia sinusoidalnego, napięcia o przebiegu „sweep sinus”, napięcia o przebiegu „sweep ramp”, napięcia o przebiegu „sweep sinus”, napięcia o przebiegu „sweep ramp”.



Rys.12. Wybrane przebiegi napięć, modelujące przebiegi składowych oscylacyjnych napięć powstających w układach elektroenergetycznych: a) udar napięciowy prostokątny, b) napięcie sinusoidalne, c) napięcie o przebiegu „sweep sinus”, d) napięcie o przebiegu „sweep ramp”, e) udar napięciowy piorunowy

Obiektami doświadczalnymi były uzwojenia transformatorów o następujących parametrach znamionowych:

- 25 MVA, 110 kV (produkcja -ABB),
- 25 MVA, 15 kV (produkcja -ABB),
- 250 kVA, 15 kV (produkcja -ABB),
- 20 kVA, 15 kV (produkcja -Fabryka „Mefta” w Mikołowie).

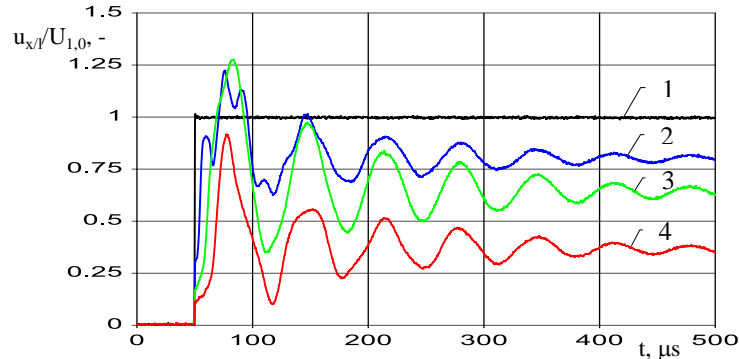


Rys. 13. Widoki uzwojeń transformatorów doświadczalnych: a – uzwojenie o napięciu znamionowym 110 kV transformatora 25 MVA, b – uzwojenie o napięciu znamionowym 15 kV transformatora 25 MVA, c – uzwojenia 15 kV transformatora 250 kVA, d – widok transformatora 20 kVA 15/0,4 kV

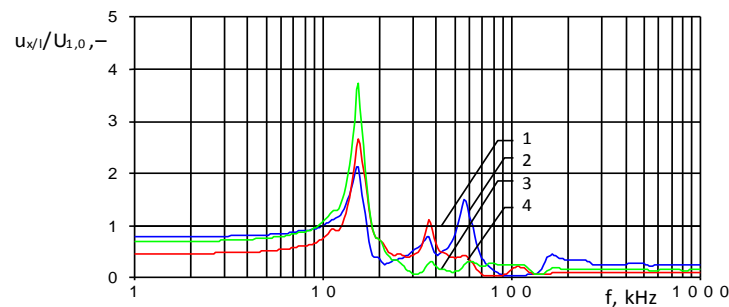
Tabela 3. Parametry znamionowe transformatorów doświadczalnych

S_n , kVA	25 000	250	20
U_n , kV	110/15	15/0,4	15/0,4
U_z , %	11	4,5	4,2
ΔP_{Fe} , kW	7,2	0,486	0,114
ΔP_{Cu} , kW	155	3,509	0,525
I_0 , %	0,5	1,0	2,8

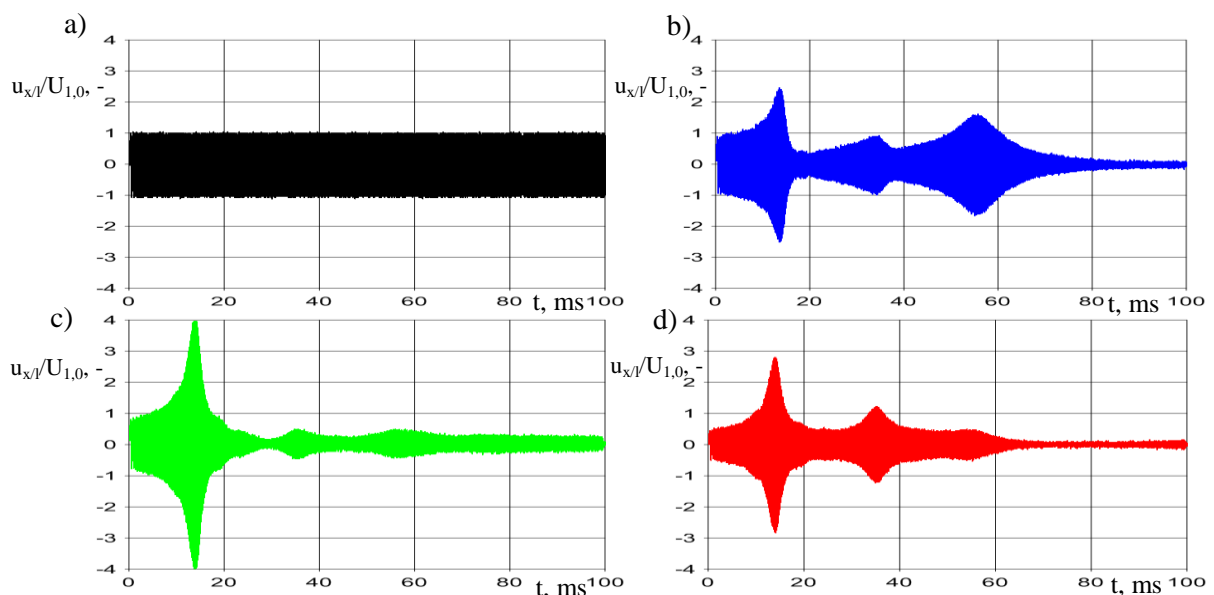
Wyniki badań przepięć narażających układy izolacyjne uzwojeń transformatorów doświadczalnych mają postać przebiegów napięć przejściowych oraz zależności częstotliwościowych napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń o współrzędnych $x/l = 0,25; 0,5$ i $0,75$ (rys. 14-17). Na podstawie wyników badań wyznaczono wartości maksymalne przepięć wewnątrz uzwojeń transformatorów (tabele: 4 i 5).



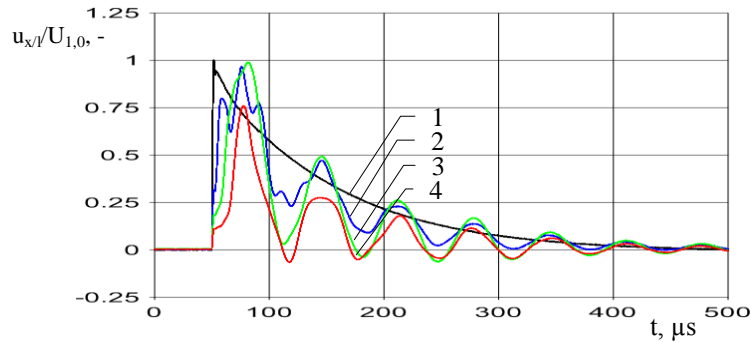
Rys. 14. Przebiegi napięć doziemnych w punktach x/l uzwojeń transformatora 15 kV Tr 20 kVA (rys. 13d): 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$
napięcie modelowe: uderzenie napięciowe prostokątne



Rys. 15. Zależności częstotliwościowe napięć w punktach x/l uzwojeń transformatora 15 kV Tr 20 kVA (rys. 13d): 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$
napięcie modelowe: napięcie sinusoidalne



Rys. 16. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA powstających podczas działania napięcia „sweep sinus” w zakresie częstotliwości 1 – 100 kHz: a) $x/l = 1,0$; b) $x/l = 0,82$; c) $x/l = 0,67$; d) $x/l = 0,38$



Rys. 17. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach x/l uzwojeń transformatora 15 kV Tr 20 kVA (rys. 13d): 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$
Napięcie modelowe: udar napięciowy piorunowy

Tabela 4. Wartości maksymalne przepięć w wybranych punktach x/l uzwojenia 15 kV transformatora 20 kVA (rys. 13d) podczas działania napięć modelowych

x/l	$\frac{u_{x/l}}{U_{max}}$				
	-				
-	udar prostokątny	napięcie sinusoidalne	sweep sinus	sweep ramp	udar 1,2/50 μ s
1,00	1	1	1	1	1
0,82	1,23	2,13	2,5	1,98	0,97
0,67	1,28	3,85	3,95	2,98	0,99
0,38	0,92	2,6	2,8	2,01	0,76

Tabela 5. Wartości maksymalne napięć doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojeń o zróżnicowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych transformatorów (Rys. 13) podczas działania napięć przejściowych o różnych przebiegach wyznaczone na podstawie wyników pomiarów wyrażone w stosunku do wartości maksymalnych napięć oddziaływujących U_{max}

uzwojenie doświadczalne	x/l	$\frac{u_{x/l}}{U_{max}}$		
		-		
	-	udar prostokątny	napięcie sinusoidalne	udar piorunowy 1,2/50 μ s
transformator 25 MVA uzwojenie 110 kV	1,00	1	1	1
	0,75	0,91	3,9	0,74
	0,47	0,6	2	0,55
	0,22	0,41	0,9	0,37
transformator 25 MVA uzwojenie 15 kV	1,00	1	1	1
	0,75	0,93	4,75	0,75
	0,48	0,53	3,3	0,68
transformator 250 kVA uzwojenie 15 kV	1,00	1	1	1
	0,75	0,76	0,76	0,87
	0,42	0,48	0,57	0,67
transformator 20 kVA uzwojenie 15 kV	1,00	1	1	1
	0,82	1,23	2,13	0,97
	0,67	1,28	3,85	0,99
	0,38	0,92	2,6	0,76

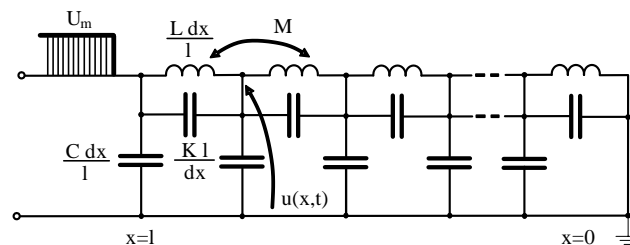
Przeprowadzone badania potwierdzają, że narażenia przepięciowe wewnętrznych układów izolacyjnych nie mogą być wyznaczone na podstawie znanej wartości napięcia udarowego docierającego do zacisków uzwojenia. Reakcja uzwojenia, od której zależą

wartości maksymalne napięć przejściowych wewnętrznych jest zróżnicowana zależnie od charakteru zmian napięcia przejściowego zewnętrznego. Narażenia przepięciowe układów izolacyjnych wewnętrznych muszą być analizowane indywidualnie dla każdego rozwiązania konstrukcyjnego uzwojenia.

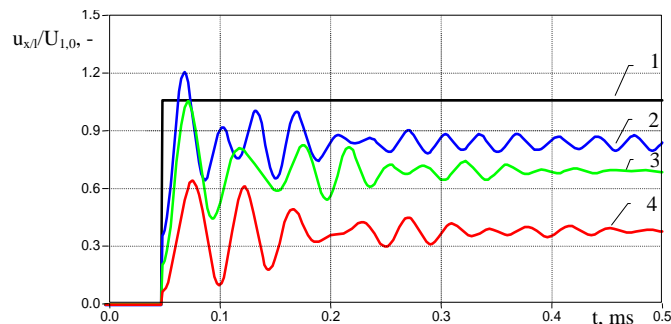
Badania wykazały, że ocena narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych w eksploatacji, wymaga szczegółowej analizy wpływu warunków pracy transformatorów na propagację przepięć. Podstawę oceny mogą stanowić badania i symulacje przepięć wykonane z uwzględnieniem warunków eksploatacji oraz rozwiązań konstrukcyjnych uzwojeń.

5.2. Symulacje przepięć wewnętrznych w uzwojeniach transformatorów

Do obliczeń przepięć w uzwojeniach zastosowano model z parametrami rozłożonymi uzwojeń, scharakteryzowany szczegółowo przez Hastermana, Hellera, Veverkę i Jakubowskiego (rys. 18) [21-23]. Symulacje przepięć w uzwojeniu transformatora 20 kVA (rys. 13d) przeprowadzono po zaimplementowaniu schematu zastępczego uzwojeń w programie *EMTP-ATP*.



Rys.18. Model z parametrami rozłożonymi uzwojeń transformatorów [21-23]



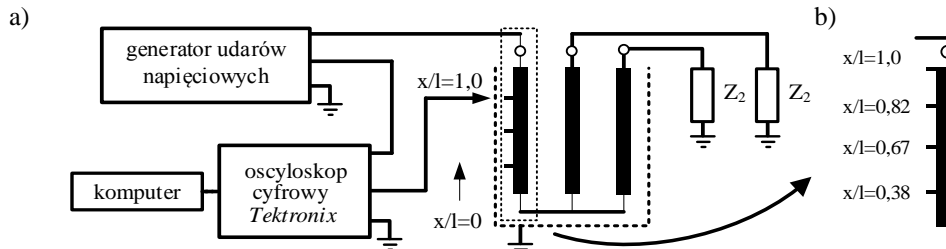
Rys.19. Wyniki symulacji przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojeń transformatora 20 kVA z uwzględnieniem tylko indukcyjności własnych cewek uzwojenia, podczas działania udaru napięciowego prostokątnego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,8$; 3 - $x/l = 0,6$; 4 - $x/l = 0,35$

Symulowano przepięcia wewnętrzne podczas oddziaływania udaru napięciowego prostokątnego między zaciskami uzwojenia (rys. 19). Z wyników symulacji przepięć doziemnych w uzwojeniu transformatora 20 kVA wynika, że przebiegi przepięć uzyskane po zaimplementowaniu schematu zastępczego uzwojeń w programie *EMTP-ATP* są zbliżone do przebiegów przepięć uzyskanych w wyniku badań, zamieszczonych na rysunku 14.

6. Analiza porównawcza narażeń przepięciowych transformatorów podczas prób napięciowych i w warunkach eksploatacji

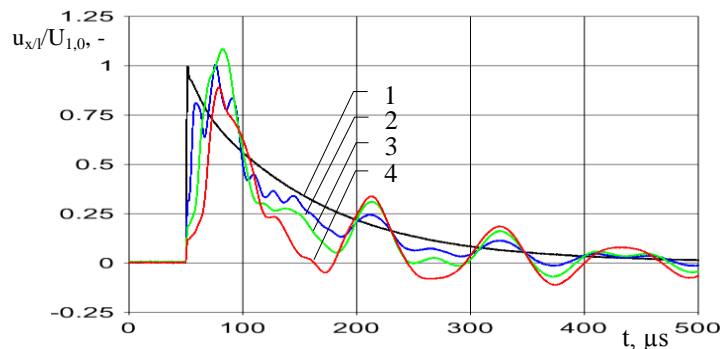
6.1. Badania przepięć w transformatorze podczas prób napięciem udarowym piorunowym

Zagadnienia dotyczące metodyki i zakresu wykonywania prób napięciowych transformatorów energetycznych, zawarte w normie IEC [24] obejmują między innymi próby napięciem probierczym udarowym piorunowym. Napięcie probiercze udarowe na zaciskach uzwojeń transformatorów powoduje przepięcia wewnętrzne w uzwojeniach, stanowiące narażenia ich układu izolacyjnego. Obiektem doświadczalnym był transformator 20 kVA .



Rys. 20. Schemat stanowiska do rejestracji przebiegów napięć przejściowych doziemnych wewnątrz transformatora 20 kVA: a) schemat ogólny stanowiska, b) oznaczenie punktów wewnątrz transformatora, w których wykonano rejestracje przepięć doziemnych

Przebiegi przepięć doziemnych w punktach o współrzędnych $x/l=0,82$; $0,67$; $0,38$ uzwojenia górnego napięcia transformatora, zarejestrowane podczas działania udaru piorunowego $u_{1,0}$ o wartości maksymalnej 300 V na zacisku o współrzędnej $x/l = 1,0$ zamieszczono na rysunku 21.



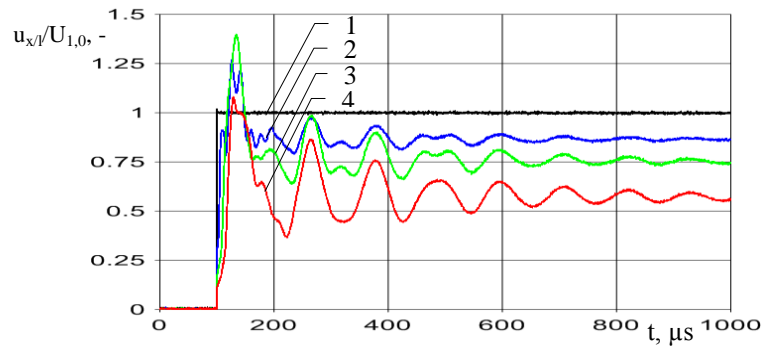
Rys.21. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach x/l uzwojeń transformatora 20 kVA podczas działania napięcia udarowego piorunowego ($Z_2 = 400 \Omega$): 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$

Przebiegi przepięć wewnątrz uzwojenia są odmienne od przebiegu napięcia udarowego piorunowego na zaciskach transformatora. Przepięcia zawierają oscylacje i częstotliwości 8,9 kHz i 15,5 kHz. Z badań wynika, że wartości maksymalne przepięć w punktach $x/l=0,82$ i $x/l=0,67$ uzwojenia są większe od wartości szczytowej udaru napięciowego piorunowego.

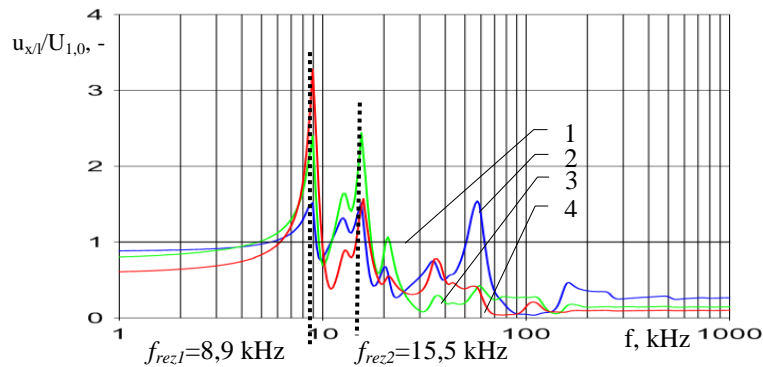
6.2. Badania przepięć w transformatorze podczas działania udarów modelujących przepięcia w układach elektroenergetycznych

W celu porównania narażeń przepięciowych układu izolacyjnego transformatora podczas prób napięciowych z narażeniami przepięciowymi w warunkach eksploatacji, wykonano rejestracje przepięć w uzwojeniu transformatora 20 kVA, poddanego działaniu napięć modelujących w przybliżeniu przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych. Program obejmował rejestracje przepięć w transformatorze podczas działania udaru napięciowego prostokątnego, napięcia sinusoidalnego o częstotliwości w zakresie od 1 kHz do 1 MHz, napięcia o przebiegu „sweep sinus”, napięcia o przebiegu

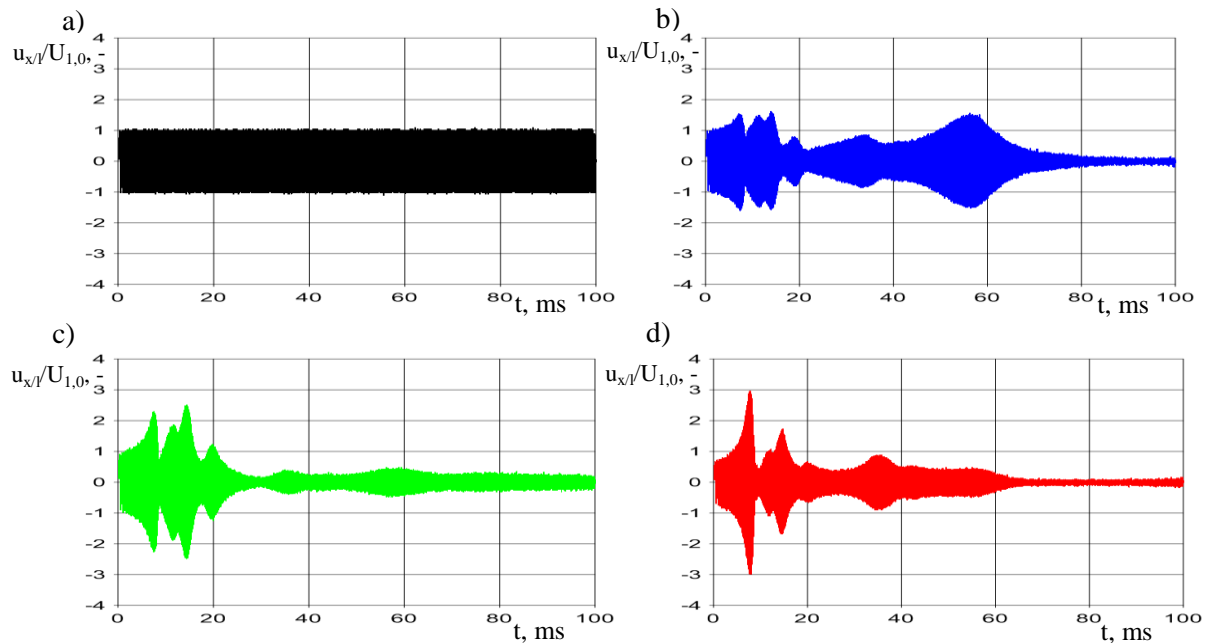
„sweep ramp”, napięcia sinusoidalnego nietłumionego i tłumionego o częstotliwości równej częstotliwości własnej transformatora (rys. 22-25).



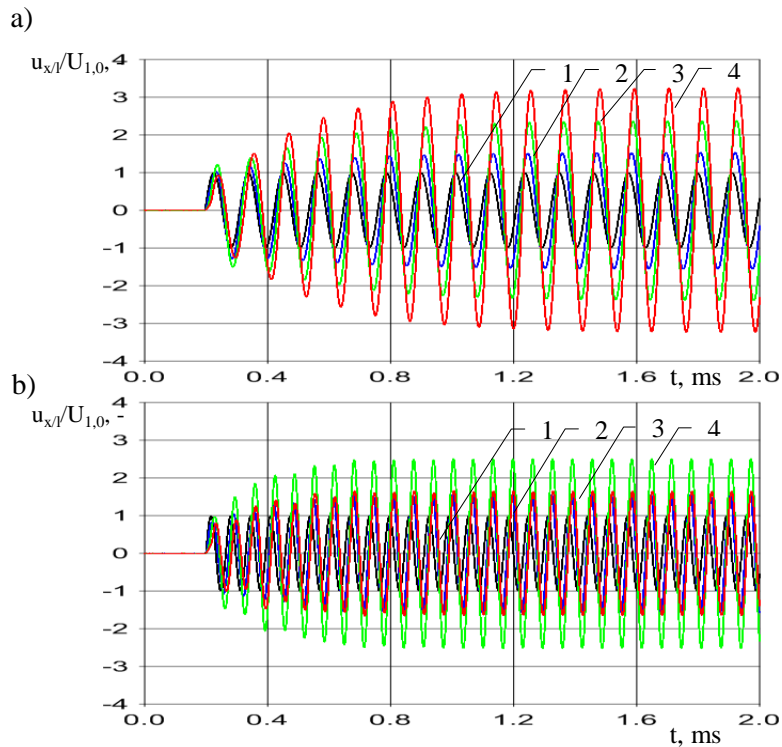
Rys. 22. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA podczas działania udaru napięciowego prostokątnego ($Z_2 = 400 \Omega$); 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$



Rys. 23. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA podczas działania napięcia o przebiegu sinusoidalnym ($Z_2 = 400 \Omega$): 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$



Rys. 24. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA podczas działania napięcia o przebiegu „sweep sinus” dla $Z_2 = 400 \Omega$: a) $x/l=1,0$; b) $x/l=0,82$; c) $x/l=0,67$; d) $x/l=0,38$



Rys. 25. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych w punktach x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA podczas działania napięcia sinusoidalnego o częstotliwości: a) $f_{rez1}=8,9$ kHz, b) $f_{rez2}=15,5$ kHz: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$ ($Z_2 = 400 \Omega$)

Badania przepięć w transformatorze wykazały, że z powodu różnych przebiegów udarów napięciowych probierczych i przepięć powstających podczas pracy transformatora przebiegi i wartości maksymalne przepięć wewnątrz transformatora podczas prób napięciem udarowym układów izolacyjnych i w warunkach eksploatacji są zróżnicowane.

6.3. Analiza porównawcza wartości maksymalnych przepięć w transformatorze podczas prób napięciem udarowym piorunowym i w warunkach eksploatacji

Dla transformatorów o napięciu znamionowym 15 kV stosowane są znamionowe napięcia udarowe probiercze piorunowe o wartościach maksymalnych $U_{max} = 95$ kV i 75 kV. Napięcie równe 95 kV jest napięciem podstawowym, natomiast napięcie 75 kV może być stosowane jeżeli zapewniona jest koordynacja izolacji transformatora [24]. Do tych wartości maksymalnych znormalizowanych napięć wytrzymywanych odniesione zostały wyznaczone eksperymentalnie wartości maksymalne przepięć w punktach x/l w uzwojeniach transformatora przedstawionych na rysunku 21 i zamieszczone w tabeli 6. Na przykład w punkcie uzwojenia o współrzędnej $x/l = 0,67$ przepięcie doziemne podczas próby udarem napięciowym piorunowym 95 kV wynosi $1,08 \cdot 95 = 102,6$ kV. Jeżeli próba jest wykonywana napięciem udarowym piorunowym 75 kV, to wartość maksymalna przepięcia w tym punkcie uzwojenia wynosi 81 kV. Oznacza to, że wartości przepięć w uzwojeniu podczas prób napięciem udarowym piorunowym są większe od wartości maksymalnej stosowanego udarowego napięciowego probierczego.

Tabela 6. Wartości maksymalne przepięć doziemnych w transformatorze doświadczalnym 20 kVA podczas prób napięciem udarowym piorunowym i w warunkach eksploatacji, wyznaczone na podstawie wyników badań przedstawionych na rysunkach 21–25 ($Z_2 = 400 \Omega$)

rodzaj udaru x/l	przepięcia podczas prób	przepięcia w warunkach eksploatacji				
	napięcie udarowe piorunowe 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$	udar prostokątny	sinus	sweep sinus	sweep ramp	sinus tłumiony
	kV					
1	2	3	4	5	6	7
	napięcie probiercze 95 kV	sieć punktem neutralnym uziemionym przez rezystor (ograniczniki o napięciu $U_c=12 \text{ kV}$)				
1,00	95,0	42,0	31,1	31,1	31,1	31,1
0,82	95,0	53,3	48,2	52,9	-43,5	34,2
0,67	102,6	59,2	78,4	77,8	-65,3	52,9
0,38	84,6	45,4	102,6	94,9	62,2	59,1
	napięcie probiercze 95 kV	sieć z punktem neutralnym izolowanym od ziemi (ograniczniki o napięciu $U_c=18 \text{ kV}$)				
1,00	95,0	63,0	46,7	46,7	46,7	46,7
0,82	95,0	80,0	72,4	79,4	-65,4	51,4
0,67	102,6	88,8	117,7	116,8	-98,1	79,4
0,38	84,6	68,0	154,1	142,4	93,4	88,7
	napięcie probiercze 75 kV	sieć punktem neutralnym uziemionym przez rezystor (ograniczniki o napięciu $U_c=12 \text{ kV}$)				
1,00	75,0	42,0	31,1	31,1	31,1	31,1
0,82	75,0	53,3	48,2	52,9	-43,5	34,2
0,67	81,0	59,2	78,4	77,8	-65,3	52,9
0,38	66,8	45,4	102,6	94,9	62,2	59,1
	napięcie probiercze 75 kV	sieć z punktem neutralnym izolowanym od ziemi (ograniczniki o napięciu $U_c=18 \text{ kV}$)				
1,00	75,0	63,0	46,7	46,7	46,7	46,7
0,82	75,0	80,0	72,4	79,4	-65,4	51,4
0,67	81,0	88,8	117,7	116,8	-98,1	79,4
0,38	66,8	68,0	154,1	142,4	93,4	88,7

W celu analizy narażeń przepięciowych układu izolacyjnego transformatora w warunkach eksploatacji wyznaczono wartości maksymalne przepięć w punktach x/l transformatora występujące podczas działania napięć modelujących przepięcia pojawiające się na zaciskach transformatora w warunkach eksploatacji. Wartości przepięć odniesiono do znamionowych napięć obniżonych (piorunowego i łączeniowego) ograniczników przepięć stosowanych w sieciach elektrycznych 15 kV pracujących z automatycznym wyłączaniem zwarć doziemnych i bez automatycznego wyłączania zwarć doziemnych.

Na podstawie badań porównawczych narażeń przepięciowych transformatorów podczas oddziaływania napięć udarowych piorunowych, stosowanych w próbach napięciowych oraz przepięć powstających w warunkach eksploatacji można stwierdzić, że narażenia przepięciowe fragmentów układu izolacyjnego transformatora doświadczalnego, chronionego zewnętrznymi ogranicznikami przepięć podczas działania napięć modelujących przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych, są większe od narażeń powstających podczas działania napięcia udarowego piorunowego stosowanego podczas prób napięciowych transformatorów.

Ocena narażeń układów izolacyjnych transformatorów od przepięć wymaga szczegółowej analizy reakcji transformatorów na przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych w celu potwierdzenia skuteczności ochrony transformatorów współpracujących z zewnętrznymi ogranicznikami przepięć. W celu zwiększenia skuteczności ochrony przepięciowej układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów oprócz ograniczników przepięć zewnętrznych stosowane są także ograniczniki wewnętrzne, włączane między fragmentami uzwojeń, oraz złożone układy elektryczne *RLC*, instalowane na zewnątrz transformatorów [25-28]. Stosowanie dodatkowej ochrony przepięciowej transformatorów wymaga potwierdzenia wpływu włączenia ograniczników wewnętrznych lub dodatkowych układów elektrycznych na zmianę narażeń przepięciowych układów izolacyjnych uzwojeń na podstawie wyników badań eksperymentalnych lub symulacji komputerowych.

7. Podsumowanie

Efektom rozprawy doktorskiej jest:

- wykonanie badań przepięć narażających układy izolacyjne zewnętrzne i wewnętrzne transformatorów w warunkach eksploatacji oraz wykonanie badań przepięć w transformatorach w warunkach prób napięciowych,
- opracowanie modelu fragmentu układu elektroenergetycznego z transformatorem rozdzielczym w programie *Electromagnetics Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP–ATP)* z wykorzystaniem środowiska programowania wewnętrznego *MODELS* i wykonanie symulacji przepięć piorunowych i łączeniowych w układzie z wyłącznikiem próżniowym,
- analiza narażeń przepięciowych układów izolacyjnych zewnętrznych, zmieniających się w warunkach eksploatacji transformatorów, podczas oddziaływania udarów napięciowych o zróżnicowanych przebiegach powstających w układach elektroenergetycznych podczas wyładowań piorunowych i czynności łączeniowych z uwzględnieniem ochrony przepięciowej transformatorów.

W toku przygotowywania rozprawy:

- wykonano badania przepięć powstających wewnątrz uzwojeń podczas oddziaływania napięć o przebiegach modelujących przepięcia w układach elektroenergetycznych,
- opracowano model fragmentu sieci średniego napięcia w programie *EMTP–ATP* i wykonano symulacje przepięć narażających transformatory rozdzielcze podczas wyładowań piorunowych oraz podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi.
- przeprowadzono analizę porównawczą narażeń przepięciowych transformatorów w warunkach eksploatacji i podczas prób napięciem udarowym piorunowym – na podstawie rejestracji przepięć w transformatorze powstających podczas działania udaru napięciowego piorunowego.

Literatura

1. Bickford J. P., Heaton A. G.: Transient overvoltages on power systems, IEE Proc., Vol. 133, pt. C, No. 4, May 1986, pp. 201 – 223
2. Gustavsen B.: Study of transformer resonant overvoltages caused by cable–transformer high–frequency interaction, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 25, No. 2, April, 2010, pp. 770 – 779
3. Henriksen E. E.: Study of very fast transients overvoltages in transformers, Electra, No. 179, Aug. 1998, pp. 13 – 23.

4. Hori M., Nishioka M., Ikeda Y., Naguchi K., Kajimura K., Motoyama H., Kawamura T.: Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1600 – 1606
5. Knorr W., Müller W., Peschke W.: Das Verhalten von ZnO-Elementen in heißem Transformatorenöl, *Elektrizitätswirtschaft*, Jg. 84, 1985, Heft 8, s. 274 – 280.
6. Morched A. S., Marti L., Brierly R. H., Lackey J. G., Analysis of internal winding stresses in EHV generator set-up transformer failures, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 888 – 894
7. Paap G. C., Alkema A. A., Sluis L.: Overvoltages in power transformers caused by no-load switching, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 10, No. 1, 1995, pp. 301 – 307
8. Pretorius R. E., Goosen P. V.: Practical investigation into repeated failures of 400/220 kV auto-transformers in the Eskom network – results and solutions, *CIGRE Session*, 1984, paper 12 - 14
9. Schei A., Alstad K., Sund J. B., Rian W.: Resonant overvoltages in power station transformers initiated by switching transients in the connected cable network, *CIGRE Session*, 29 Aug. – 6 Sept., 1984, paper 12 – 7
10. Furgał J., Pająk P.: Analiza narażeń układów izolacyjnych transformatorów rozdzielczych od przepięć piorunowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2012, nr 31, str. 53 – 56
11. Popow M., van der Sluis L.: Improved calculations for no-load transformer switching surges, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.16, No. 3, July 2001. pp. 401 – 408
12. Wong S. M., Snider L. A., Loi E. W.: Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker. *Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. IPST'2003*, 28 Sept.-2 Oct. 2003, New Orleans, paper 14a.3
13. Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych, PAN: Komitet Elektrotechniki, Seria Wydaw.: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 25, Ofic. Wydaw. Pol. Wrocławskiej, 2005
14. Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 14, Nr 4, Oct. 1999, pp. 1317 -1322
15. Helmer J., Lindmayer M.: Mathematical Modeling of the High frequency Behavior of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems, XVIIth Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum, Berkeley 1996, pp.323– 331
16. Dommel H. W and et.al., *Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Portland, OR: Prepared for BPA, Aug. 1986
17. *MODELS, Theory Book*, 1999
18. Shibuya Y., Fujita S., Hosokawa N.: Analysis of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Winding. *IEE Proc.–Gener. Transf. Distr.* Vol.144, No. 5, Sept. 1997, pp. 461 - 468
19. Shibuya Y., Fujita S., Shimomura T.: Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer. *IEE Proc. – Gener. Transform. Distrib.*, Vol.146, No. 4, July 1999, pp. 459 – 464
20. Changping A., Wenxia S., Shiwei L., Leguan G.: Vacuum circuit breaker overvoltage for interrupting unloaded transformer. 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 20–24 August 2001, Bangalore (India), paper 3.4
21. Hasterman Z.: Przebiegi udarowe w transformatorach, *Post. Techn. Wys. Napięć*, PWN, Warszawa, Z. 2, 1960
22. Heller B., Veverka A.: Surge phenomena in electrical machines, *Czechoslovak Academy of Sciences*, Prague, 1968.
23. Jakubowski J. L.: *Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa, 1968.
24. IEC 60076-3 Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.

25. Piasecki W., Bywalec G., Florkowski M., Fulczyk M., Furgal J.: New approach towards very fast transients suppression, Int. Conf. on Power Syst. Trans., IPST'07, Lyon, paper No. 167
26. 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
27. 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
28. 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 151