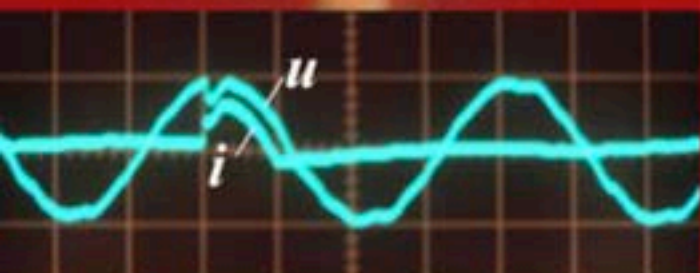




Krystian Leonard Chrzan



Ćwiczenia w laboratorium
wysokich napięć

***ĆWICZENIA W
LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ***

Krzystian Leonard Chrzan

Wrocław 2012

Recenzent:

dr inż. Adam Tymań

Projekt okładki:

Janusz Petri

Copyright © by Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne

Wydanie I

ISBN 978-83-7125-225-9

**Autor poświęca tę pracę mgr inż. Jerzemu Lisieckiemu, kierownikowi Laboratorium
Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej w latach
1954 – 1995**

Adiunkt Jerzy Lisiecki zbudował przed laty stanowiska laboratoryjne, które są ciągle wykorzystywane przez kolejne roczniki studentów Wydziału Elektrycznego. Napisał również instrukcje, które stanowią podstawę większości ćwiczeń opisanych w niniejszym skrypcie.

**Wydanie skryptu zostało sfinansowane przez firmę Elektrotim S.A.,
zatrudniającą wielu absolwentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.**

Książki Dolnośląskiego Wydawnictwa Edukacyjnego dostępne są w sprzedaży wysyłkowej.

Zamowienia prosimy kierować pod adresem:

Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne

53-204 Wrocław, ul. Ojca Beyzyna 20/b, tel./fax (71) 363-26-85

<http://www.dwe.wroc.pl>

e-mail: biuro@dwe.wroc.pl

SPIS TREŚCI

Przedmowa	4
Część I. Zarys teorii do poszczególnych ćwiczeń	
Teoria do ćw. I Układ probierczy i pomiary wysokiego napięcia przemiennego.....	6
Teoria do ćw. II Przebiegi falowe i model linii długiej.....	11
Teoria do ćw. III Wytwarzanie i pomiar napięcia stałego.....	15
Teoria do ćw. IV Wytrzymałość powietrza w polu równomiernym lub słabo równomiernym.....	18
Teoria do ćw. V Wytrzymałość powietrza w polu nierównomiernym.....	22
Teoria do ćw. VI Wytrzymałość powierzchniowa.....	25
Teoria do ćw. VII Pomiar współczynnika strat dielektrycznych i wyładowań niezupełnych.....	32
Teoria do ćw. VIII Rozkład napięcia wzdłuż izolatorów.....	36
Teoria do ćw. IX Wytwarzanie udarów napięciowych.....	42
Teoria do ćw. X Diagnostyka ograniczników przepięć.....	46
Teoria do ćw. XI Prąd upływu na zabrudzonym izolatorze.....	49
Teoria do ćw. XII Zjawisko odwrócenia biegunowości w słabo nierównomiernym polu elektrycznym.....	52
Część II. Opis poszczególnych ćwiczeń	
I Układ probierczy i pomiary wysokiego napięcia przemiennego.....	55
II Przebiegi falowe i model linii długiej.....	61
III Wytwarzanie i pomiar napięcia stałego.....	66
IV Wytrzymałość powietrza w polu równomiernym lub słabo równomiernym.....	71
V Wytrzymałość powietrza w polu nierównomiernym.....	76
VI Wytrzymałość powierzchniowa.....	82
VII Pomiar współczynnika strat dielektrycznych i wyładowań niezupełnych.....	87
VIII Rozkład napięcia wzdłuż izolatorów.....	94
IX Wytwarzanie udarów napięciowych.....	100
X Diagnostyka ograniczników przepięć.....	108
XI Prąd upływu na zabrudzonym izolatorze.....	113
XII Zjawisko odwrócenia biegunowości w słabo nierównomiernym polu elektrycznym.....	121
Załącznik A. Pokazy eksperymentów w laboratorium wysokich napięć.....	127
Załącznik B. Bezpieczeństwo w laboratorium wysokich napięć.....	136
Załącznik C. Opis teczki do sprawozdań.....	138
Załącznik D. Formatka do sprawozdania.....	139
Załącznik E. Historia laboratorium wysokich napięć.....	140
Załącznik F. Znani polscy wysokonapięciowcy.....	143

Przedmowa autora

Niniejszy skrypt jest przeznaczony dla studentów studiów dziennych i zaocznych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej. Zawarty materiał ma pomóc studentom w przygotowaniu się do ćwiczeń, przeprowadzeniu pomiarów, sporządzeniu protokołów pomiarowych i opracowaniu sprawozdań. Omówiono w nim 12 różnych ćwiczeń, które mogą być wykonywane w dowolnej kolejności. Część pierwsza zawiera krótkie podstawy teoretyczne do ćwiczeń, których opis zestawiono w części drugiej. W części trzeciej opisano eksperymenty wysokonapięciowe. Niektóre z nich demonstrowane są w ramach pokazu wyładowań elektrycznych w hali wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej a także w wielu innych tego typu laboratoriach.

Laboratorium Wysokich Napięć w którym odbywają się zajęcia zostało zaprojektowane przez Prof. Jerzego Ignacego Skowrońskiego i mgr inż. Jerzego Lisieckiego na początku lat 1950-tych. Jednak początki wysokich napięć we Wrocławiu mają ponad stuletnią historię. Tym historycznym zagadnieniom poświęcona jest ostatnia część książki.

W języku polskim dostępnych jest kilka podręczników techniki wysokich napięć. Pod koniec XX wieku znaczną popularnością cieszyła się praca Prof. Szpora [1] stopniowo zastępowana przez „Technikę Wysokich Napięć” Zdobysława Flisowskiego, która ma już 8 wydań [2]. Bardzo interesująca jest książka Prof. Wodzińskiego [3] poprzedzona kilkoma wcześniejszymi pracami tegoż autora. Bardziej specjalistycznymi pozycjami są dwutomowe prace pod redakcją Romualda Kosztaluka [4] i Hanny Mościckiej-Grzesiak [5, 6]. Istnieje również kilka skryptów wydanych w poszczególnych ośrodkach akademickich. We Wrocławiu wydano pracę zbiorową pod redakcją Jarosława Juchniewicza i Jerzego Lisieckiego [7] oraz autorstwa Janusza Fleszyńskiego [8]. Oferta skryptów do zajęć w laboratorium wysokich napięć jest bardzo duża [9-24]. Wynika to ze znacznej liczby Uczelni w Polsce oferujących tego rodzaju wykład połączony z praktycznymi zajęciami w laboratorium (Warszawa, Kraków, Wrocław, Opole, Gliwice, Rzeszów, Lublin, Częstochowa, Poznań, Szczecin, Gdańsk, Białystok, Kielce i Zielona Góra). Uczelniane laboratoria wysokonapięciowe umieszczone są w różnych pomieszczeniach i dysponują różnym wyposażeniem technicznym i kadrowym. Dlatego każdy ośrodek w ciągu lat opracował swój własny zestaw ćwiczeń.

Prawie wszystkie przedstawione ćwiczenia zostały opracowane przed wielu laty przez Jerzego Lisieckiego. Tylko dwa są własnym opracowaniem autora „Prąd upływu na zabrudzonym izolatorze napowietrznym” oraz „Efekt odwrócenia biegunowości w układach izolacyjnych o słabej nierównomierności pola elektrycznego”. W kilku ćwiczeniach dokonano również pewnych modyfikacji ich programu.

Literatura

Podręczniki do wykładu

- [1]Flisowski Z. Technika Wysokich Napięć.
- [2]Szpor S., Dzierżek H., Winiarski W., Technika wysokich napięć. PWN Warszawa 1978
- [3]Wodziński J., Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. PWN Warszawa 1997
- [4]Kosztaluk R. (red.), Technika badań wysokonapięciowych. Tom 1, Tom 2, WNT, Warszawa 1985
- [5]Mościcka-Grzesiak H.(red.), Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom 1, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1996
- [6]Mościcka-Grzesiak H.(red.), Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom 2, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1999
- [7]Juchniewicz J., Lisiecki J., (red.), Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1980
- [8]Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999

Skrypty do ćwiczeń laboratoryjnych

- [9]Marx E., Laboratorium Wysokich Napięć. PWT Warszawa 1951, przekład z niemieckiego w opracowaniu W. Lidmanowskiego
- [10]Skowroński J., Laboratorium wysokich napięć. PZWS, PWN Wrocław 1951
- [11]Krawczyński R., Lidmanowski W., Roguski Z., Stańczak B, Laboratorium wysokich napięć, wyd. 2., Zakład Graficzny Politechniki Warszawskiej 1968
- [12]Pohl Z., Laboratorium wysokich napięć. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1970
- [13]Stępniewski T. i inni, Laboratorium techniki wysokich napięć i materiałoznawstwa elektrycznego. Politechnika Śląska, Gliwice 1979.
- [14]Brzostek E., Juzwa B., Kędzia J., Komorowski W., Skubis J., Laboratorium wysokich napięć. wyd. 2, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu 1981.
- [15]Kacejko L., Karwat C., Wójcik H., Laboratorium techniki wysokich napięć, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 1982.
- [16]Florkowska B., Technika wysokich napięć : materiały do wykładów i laboratorium. Wydanie 2. Wydawnictwo AGH, Kraków 1992
- [17]Strykowski ., Paciorek Z., Ćwiczenia laboratoryjne wysokonapięciowe. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, 1999
- [18]Wira A., Zybert R., Laboratorium techniki wysokich napięć. Politechnika Łódzka 1973, 2003.
- [19]Mościcka-Grzesiak H. (red.) „Ćwiczenia laboratoryjne z materiałoznawstwa elektrotechnicznego i techniki wysokich napięć”. Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2002..
- [20]Gacek. Z., Kiś W., Laboratorium wysokich napięć. Zarys techniki probierczej i pomiarowej. Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
- [21]Flisowski Z. (red.), Laboratorium techniki wysokich napięć. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006.
- [22]Boryń H., Olesz M., Rynkowski A., Wojtas S., Laboratorium Techniki wysokich napięć. Politechnika Gdańska 2007.
- [23]Boczar T. (red.), Laboratorium techniki wysokich napięć. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2008 .
- [24]Chrzan K.L., High voltage laboratory training. Wrocław University of Technology 2011

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA I

UKŁAD PROBIERCZY I POMIARY WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

1. Układ probierczy

Wysokie napięcie przemienne wytwarzane jest za pomocą zespołu probierczego składającego się z:

- układu zasilającego (źródła napięcia), stanowiącego zazwyczaj układ jednofazowy sieci nn,
- urządzenia regulacyjnego,
- transformatora probierczego.

Urządzenie regulacyjne zapewnia płynną regulację napięcia. Przy niewielkich mocach (kilkadziesiąt kVA) zadanie to spełniają autotransformatory lub transformatory regulacyjne ze szczotką przeskakującą ze zwoju na zwój. Przy większych mocach stosowane są transformatory z przesuwnym rdzeniem lub zespoły wirujące (silnik zasilający prądnicę).

W porównaniu z transformatorem energetycznym, transformator probierczy ma znacznie większą przekładnię a mniejszą moc. Ze względu na warunki pracy (np. brak zagrożeń ze strony wyładowań atmosferycznych) transformator probierczy ma znacznie mniejszy zapas wytrzymałości elektrycznej izolacji (ok. 40%) a zatem i mniejsze wymiary. Małe wymiary wynikają również z małej mocy transformatora i często stosowanej obudowy izolacyjnej z papieru bakelizowanego. W takim przypadku nie ma izolatorów przepustowych.

Parametrami zespołu probierczego są:

- napięcie znamionowe,
- moc znamionowa
- moc zwarciowa.

Napięcie znamionowe jest to najwyższe napięcie, które można zastosować podczas prób, jest to napięcie po stronie uzwojenia wysokiego napięcia. Moc znamionowa to iloczyn napięcia znamionowego i prądu znamionowego ciągłego $S_n = U_n \cdot I_n$. Ze względu na krótki czas trwania prób probierczych określa się również prąd znamionowy 15 minutowy. Jest on większy od prądu ciągłego i pozwala na krótkie, większe obciążenie transformatora bez przekroczenia dopuszczalnej temperatury uzwojeń.

Badane obiekty stanowią zazwyczaj obciążenie o charakterze pojemnościowym i pobierają tylko prąd pojemnościowy. Zatem pobieraną moc można obliczyć znając pojemność obiektu badań C i napięcie probiercze U .

$$S = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (1)$$

Prąd zwarciowy zespołu probierczego musi być odpowiednio duży aby przed wyładowaniem pełnym spadki napięcia nie były zbyt duże. Z tego względu prąd ten nie powinien być mniejszy od 0,1 A przy próbach na sucho i od 0,5 A podczas prób pod sztucznym deszczem w całym zakresie stosowanych napięć probierczych.

Wykonując próby napięciowe należy pamiętać, że przekładnia napięciowa transformatorów probierczych nie jest wartością stałą ale zależy od obciążenia. Z reguły jest ona większa od przekładni zwojowej, co wynika z pojemnościowego charakteru obciążenia. Dlatego pomiar napięcia probierczego powinien być wykonywany po stronie wtórnej transformatora. Pomiar po stronie pierwotnej i mnożenie wyniku pomiaru przez przekładnię zwojową może być obciążony znacznym błędem. Wyskalowanie woltomierza po niskiej stronie napięcia w kV jest dopuszczalne przy przeznaczeniu zespołu probierczego do badania obiektów tego samego typu (o tej samej pojemności).

Po przebiciu lub przeskoku na badanym obiekcie, transformator przechodzi ze stanu jałowego w stan zwarcia i musi być natychmiast wyłączony. Realizują to zwykle zabezpieczenia nadprądowe.

Przebiegi jakie mogą powstać w momencie przebiecia lub przeskoku mogą zagrażać izolacji transformatora. Wynika stąd konieczność stosowania rezystorów tłumiących. Tłumienie przebiecia jest wystarczające gdy rezystancja w obwodzie wynosi kilkaset omów, dlatego w laboratorium najczęściej stosowany jest rezystor tłumiący 500 Ω. Gdy prąd łuku jest duży a czas palenia długi, wówczas kule iskiernika mogą ulec uszkodzeniu, np. erozji. Dlatego może okazać się koniecznym dodatkowe ograniczenie prądu zwarciovego rezystorem ograniczającym. Jego wartość powinna być tak dobrana aby prąd zwarciovowy nie przekroczył krótkotrwałego prądu znamionowego transformatora lub regulatora napięcia. Można go zainstalować po stronie wysokiego napięcia. Rezystor musi wówczas mieć nie tylko odpowiednią rezystancję ale również odpowiednią wytrzymałość elektryczną i cieplną. Wygodnie jest zainstalować rezystor ograniczający po stronie niskiego napięcia transformatora probierczego. Wystarczy wtedy bardzo mała rezystancja, bo równoważna rezystancja po stronie wysokiego napięcia jest iloczynem rezystancji po stronie nn i kwadratu przekładni transformatora probierczego.

$$R_{on} = \frac{(R_{ow} - R_t)}{\eta^2} \quad (2)$$

gdzie: R_{on} – rezystancja ograniczająca prąd zwarciovowy umieszczona po stronie nn.

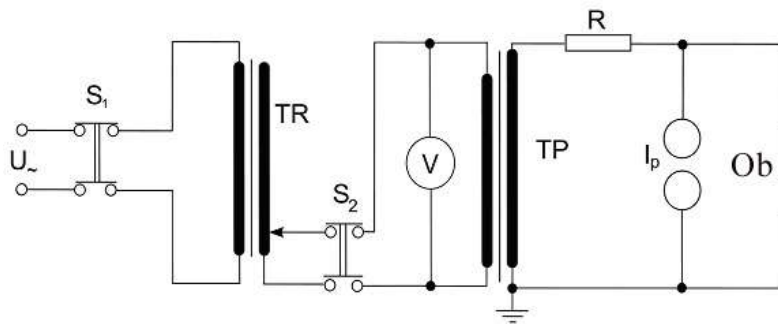
R_{ow} – rezystancja ograniczająca po stronie wn

R_t - rezystancja tłumiąca

η - przekładnia transformatora probierczego

Jeżeli prąd zwarcia nie przekracza wartości prądu dla pracy dorywczej zespołu probierczego, wówczas można nie stosować zabezpieczeń nadprądowych – wyłączenie napięcia może odbywać się ręcznie.

Wyższe harmoniczne mogą być generowane zarówno przez transformator probierczy jak regulacyjny ze względu na nieliniową charakterystykę magnesowania. Wyższe harmoniczne pochodzące z sieci zasilającej są zazwyczaj znacznie mniejsze. Zniekształcenie napięcia może wystąpić przy zastosowaniu transformatora regulacyjnego o mocy mniejszej niż moc transformatora probierczego oraz przy stosowaniu rezystorów ograniczających po stronie niskiego napięcia.



Rys. 1. Układ probierczy z podstawowymi elementami

TR - transformator regulacyjny

TP - transformator probierczy

S_1, S_2 - styczniki,

V – woltomierz po stronie pierwotnej transformatora probierczego,

R- rezystor tłumiący, S_1, S_2 - styczniki,

I_p - iskiernik pomiarowy kulowy, Ob. – obiekt badany

2. Iskiernik kulowy

Iskiernik kulowy jest najprostszym i jednym z najbardziej rozpowszechnionych przyrządów do pomiaru wysokiego napięcia. Dwie jednakowe kule z miedzi lub mosiądzu osadzone są na sworzniach w układzie poziomym lub pionowym. Odstęp pomiędzy kulami może być precyzyjnie regulowany. Napięcie przebicia iskiernika zależy od średnicy elektrod, ich odstępu, rodzaju i biegunowości mierzonego napięcia a także od warunków atmosferycznych. Wartości napięć przebicia zostały umieszczone w tablicach dla znormalizowanych średnic kul i normalnych warunków atmosferycznych (PN-64/E-04050 Pomiary wysokonapięciowe).

Zależność napięcia przebicia od warunków atmosferycznych wymaga wprowadzenia poprawek. Napięcie przebicia w danych warunkach wynosi

$$U_p = k \cdot U_{pn} \quad (3)$$

gdzie: k – współczynnik zależny od względnej gęstości powietrza δ
 U_{pn} – napięcie przebicia w warunkach normalnych.

$$\delta = \frac{p}{p_n} \cdot \frac{293}{273 + t} = 0,289 \frac{p}{273 + t} \quad (4)$$

gdzie: p_n – ciśnienie normalne 1013 hPa, 293 – temperatura normalna w K
 p i t – ciśnienie i temperatura w warunkach pomiaru (hPa, °C)

Wpływ wilgoci w granicach 4 – 15 g/m³ jest nieistotny. Współczynnik k jest równy δ gdy gęstość względna mieści się w granicy 0,9 – 1,1 (to jest w zakresie, który nie jest przekraczany w warunkach wewnętrznych na niewielkich wysokościach nad poziomem morza). Opisany wyżej sposób uwzględnienia warunków atmosferycznych na wartość napięcia przebicia jest uproszczony. Dokładniejsza ale bardziej skomplikowana procedura podana jest w normie PN-EN 60060: 2011, Wysokonapięciowa technika probiercza (PN-E-04060:1992).

Iskierniki mierzą wartość maksymalną napięcia, przy pomiarach napięcia przemiennego mierzą zatem jego amplitudę. Dokładność pomiaru iskiernikiem kulowym wynosi około 3% przy odstępie elektrod „a” spełniających warunek $a \leq 0,5 D$ (D – średnica kul).

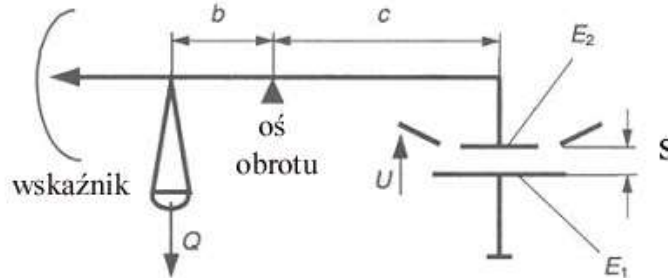
Normy podają również wymagania dotyczące uniknięcia wpływu na wynik pomiaru obcych pól oraz ustawienia iskiernika w polu probierczym w dostatecznej odległości od przedmiotów uziemionych. Uziemiony metalowy obiekt może pogorszyć rozkład pola między elektrodami i spowodować zmniejszenie napięcia przebicia. Uziemiona płyta zbliżona do iskiernika przedstawionego na rys. 2 może zmniejszyć napięcie przebicia aż o 10%.



Rys. 2. Iskiernik płyta-płyta umieszczony blisko uziemionej płyty

3. Woltomierz elektrostatyczny

Woltomierz elektrostatyczny wykorzystuje siłę Coulomba pomiędzy ładunkami elektrycznymi kondensatora do którego przyłożone jest mierzone napięcie. Siła przyciągania ruchomej elektrody kondensatora E2 jest równoważona odważnikiem Q (rys. 3). Po zrównoważeniu „wagi elektrostatycznej”, masa Q jest proporcjonalna do wartości skutecznej napięcia U.



Rys. 3. Zasada działania woltomierza elektrostatycznego

Siła F działająca na elektrodę o powierzchni A, wywołana przez napięcie U i związane z nim natężenie pola elektrycznego E

$$|F| = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot E^2}{2} = \frac{\varepsilon \cdot A}{2S^2} U^2 \quad (5)$$

gdzie: ε - przenikalność dielektryczna gazu pomiędzy elektrodami kondensatora
S – odległość elektrod kondensatora

Siła przyciągania F nie zależy od biegunowości napięcia. Jeżeli napięcie zmienia się w czasie. Wówczas, do pomiaru napięcia wykorzystuje się wartość średnią siły.

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T F(t) dt = \frac{\varepsilon \cdot A}{2S^2} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt = \frac{\varepsilon \cdot A}{2S^2} (U_{rms})^2 \quad (6)$$

Zatem woltomierz elektrostatyczny mierzy wartość skuteczną napięcia przemiennego.

$$U = S \cdot \sqrt{\frac{2F}{\varepsilon \cdot A}} \quad (\text{kV}_{rms}) \quad (7)$$

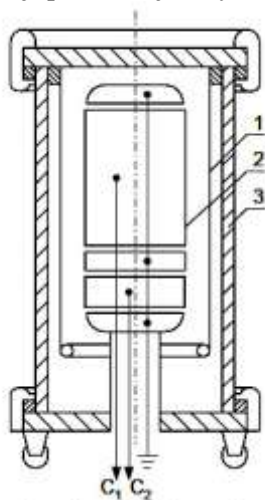
Woltomierz elektrostatyczny mierzy napięcie stałe i przemiennie ale oczywiście nie mierzy napięcia impulsowego.

4. Pojemnościowy dzielnik napięcia

Do pomiaru wysokich napięć przemiennych stosuje się bardzo często dzielniki pojemnościowe. Najprostszy dzielnik tego typu złożony jest z dwóch kondensatorów połączonych szeregowo, z wysokonapięciowego o małej pojemności C1 i niskonapięciowego o dużej pojemności C2. Miernik o dużej impedancji wewnętrznej mierzy napięcie na pojemności C2. Przekładnia napięciowa wynosi:

$$g = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (8)$$

W dokładnych dzielnikach, kondensator wysokonapięciowy jest najczęściej wzorcowym kondensatorem ciśnieniowym o konstrukcji pokazanej na rys. 4.



Rys. 4. Budowa wysokonapięciowego kondensatora ciśnieniowego. 1 – elektroda wysokonapięciowa, 2 – dzielona elektroda niskonapięciowa, 3 – obudowa izolacyjna

Literatura

- [1] Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999
- [2] Stryzowski S., Paciorek Z., Ćwiczenia laboratoryjne wysokonapięciowe. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1999

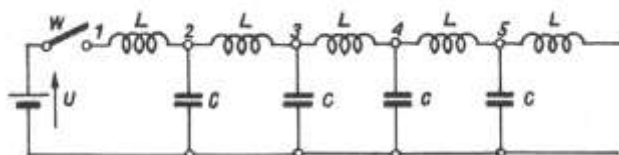
PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA II

PRZEBIEGI FALOWE W LINIACH DŁUGICH

1. Wstęp

Wskutek przepięć, zwłaszcza przepięć piorunowych, w liniach elektroenergetycznych powstają fale napięciowe – krótkie impulsy o czasie trwania rzędu mikrosekund. Ponieważ fala elektromagnetyczna w powietrzu porusza się z szybkością 300 m/μs, to przez kilkukilometrowy odcinek linii fala przepływa w ciągu kilku – kilkudziesięciu μs. Natomiast fala napięcia roboczego 50 Hz w ciągu swego półokresu – 10 ms przebywa odległość aż 3000 km. Obliczając obwody elektryczne (z elementami skupionymi) znanymi do tej pory metodami zakładano, że napięcie jest tylko funkcją czasu i zmienia się w rytm napięcia zasilającego. Rozpatrując stan w linii elektroenergetycznej po uderzeniu pioruna trzeba traktować ją jako linię długą z elementami rozłożonymi gdzie wartości chwilowe napięcia są nie tylko funkcją czasu ale również położenia, a więc $u(x, t)$.

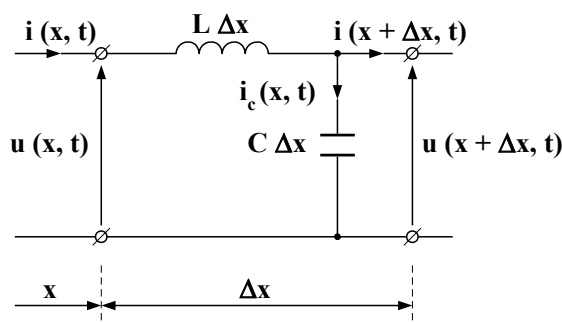
Linie długą można przedstawić jako połączenie łańcuchowe czwórników złożonych z elementów skupionych LC (pomijając rezystancje przewodu R i konduktywność izolacji G). Jest to tzw. linia bez strat złożona tylko z elementów L i C.



Rys. 1. Model linii długiej bez strat

2. Równania falowe

Rozpatrzmy odcinek Δx linii bez strat, w której parametry rozłożone są zastąpione przez elementy skupione L i C odniesione do jednostki długości linii (np. do 1 m lub 1 km).



Rys. 2. Odcinek linii bez strat o długości Δx z jednostkowymi parametrami L i C.

Równania napięć i prądów dla schematu z rys. 2 są następujące:

$$u(x, t) = L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + u(x + \Delta x, t) \tag{1}$$

$$i(x, t) = C \cdot \Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} + i(x + \Delta x, t)$$

Zakładając, że $\Delta x \rightarrow 0$ i doprowadzając te równania do postaci z jedną zmienną otrzymujemy równania falowe zwane również równaniami telegrafistów. Rozwiązanie równań telegrafistów metodą d'Alemberta ma postać sumy fal: biegnącej w przód (zgodnie ze zwrotem osi x) oraz biegnącej wstecz (w kierunku przeciwnym). Zgodnie z tym rozwiązaniem, napięcie (lub prąd) w dowolnym punkcie linii i w dowolnej chwili czasowej jest sumą tych dwóch fal

$$u = f_1(x - v \cdot t) + f_2(x + v \cdot t) = u' + u'' \quad (2)$$

$$i = \frac{1}{Z} f_1(x - v \cdot t) - \frac{1}{Z} f_2(x + v \cdot t) = i' + i''$$

gdzie: $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - prędkość rozchodzenia się fali $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - impedancja falowa linii długiej

u', i' - fale napięcia i prądu biegnące w przód, u'', i'' - fale biegnące wstecz, przy czym

$$i' = \frac{u'}{Z} \quad i'' = -\frac{u''}{Z} \quad (3)$$

Należy podkreślić, że impedancja falowa linii długiej nie zależy od długości linii a tylko od wymiarów geometrycznych i usytuowania przewodów. Natomiast impedancja falowa swobodnej przestrzeni wynosi

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120 \cdot \pi \approx 377 \ \Omega \quad (4)$$

Prędkość fali „v” zależy od stałych fizycznych ośrodka w który fala się rozchodzi.

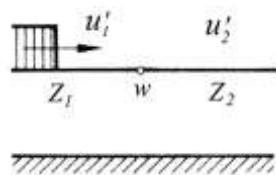
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \mu_r \epsilon_o \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad (5)$$

gdzie: c - prędkość fali elektromagnetycznej w próżni, μ_r - przenikalność magnetyczna względna, ϵ_r - przenikalność elektryczna względna

Ze wzoru (5) wynika, że prędkość fali elektromagnetycznej w kablu koncentrycznym o izolacji z polietylenu ($\epsilon_r = 4$) jest dwukrotnie mniejsza od prędkości fali elektromagnetycznej w powietrzu.

3. Przejście fali z linii na inną linię

Rozpatrujemy przypadek, w którym na końcu linii o impedancji Z_1 znajduje się linia nieskończenie długa o impedancji Z_2 . Punkt połączenia dwóch linii (punkt W na rysunku 3) nazywamy punktem węzłowym (węzłem).



Rys. 3. Dwie linie o różnych impedancjach falowych. Fala pierwotna u_1' przesuwa się w kierunku węzła W od strony linii Z_1 .

Falę biegnącą wprzód u_1' (od lewej do prawej) w linii Z_1 nazywamy falą pierwotną a falę biegnącą wstecz, odbitą od węzła W oznaczamy jako u_1'' . Falę, która biegnie w linii Z_2 po przejściu węzła W oznaczamy jako u_2' i nazywamy falą przepuszczoną.

Punkt węzłowy jest punktem wspólnym dla obu linii. Dla tego punktu można napisać:

$$u_1 = u_2 \quad (6)$$

$$u_1' + u_1'' = u_2' + u_2''$$

Ponieważ linia Z_2 jest nieskończenie długa, więc $u_2'' = 0$ (brak fali odbitej), otrzymujemy zależności pomiędzy falą padającą, odbitą i przepuszczoną

$$u_1' + u_1'' = u_2' \quad \text{dla napięć} \quad (7)$$

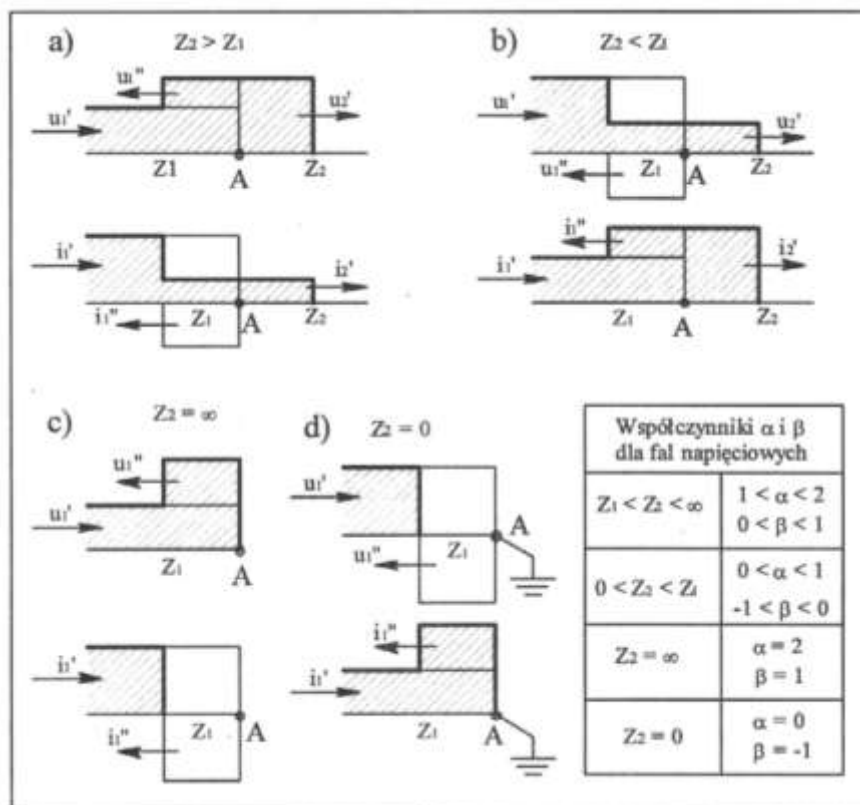
$$i_1 + i_1'' = i_2' \quad \text{dla prądów}$$

z równań tych możemy dojść do postaci wzoru na falę przepuszczoną

$$u_2' = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot u_1' = \alpha_{12} \cdot u_1' \quad (8)$$

Gdzie α nazywamy współczynnikiem przejścia fali napięciowej z linii Z_1 do linii Z_2 . Wprowadzając współczynnik odbicia β , możemy zależność (3) napisać w postaci

$$u_1'' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot u_1' = \beta_{12} \cdot u_1' \quad (9)$$

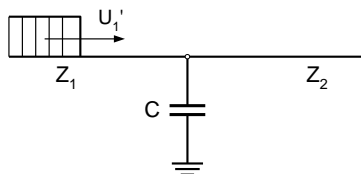


Rys. 4. Rozkłady fal napięciowych i prądowych dla przypadków: a) $Z_1 < Z_2 < \infty$, b) $0 < Z_2 < Z_1$, c) linia otwarta na końcu, d) linia zwarta na końcu. Rozkład wypadkowy zakreskowano [2]

Szczególnymi przypadkami układu z rysunku 3 jest linia rozwarta na końcu ($Z_2 = \infty$) oraz linia zwarta ($Z_2 = 0$). Na rysunku 4 pokazano rozkłady napięć i prądów wzdłuż linii dla różnych relacji między impedancjami Z_1 i Z_2 oraz zakresy zmienności współczynników odbicia i przejścia fali napięciowej. Bardzo istotnym jest, że po odbiciu fali napięciowej od otwartego końca, amplituda fali wypadkowej wzrasta dwukrotnie.

4. Przejście fali przez węzeł z równoległą pojemnością

Omówione wcześniej przejścia fal przez węzeł nie powodowały zmian kształtu fali a jedynie zmiany jej amplitudy. Przypadki omówione w tym i w następnym punkcie powodują również zmiany kształtu fali.



Rys. 5. Trafienie fali prostokątnej na węzeł z pojemnością włączoną równolegle

Po dojściu fali do kondensatora rozpoczyna się jego ładowanie ze stałą czasową zależną od Z_1 , Z_2 i C

$$T_C = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot C$$

Kondensator stanowi w pierwszej chwili zwarcie dla fali pierwotnej U_1' a następnie zaczyna się ładować do napięcia wynikającego z impedancji falowych Z_1 i Z_2 . Po czasie większym od $3 \cdot T$ kondensator nie wpływa już na wysokość napięcia, jest naładowany. Kondensator włączony równolegle do linii łągodzi stromość fal przejściowych.

5. Trafienie fali na indukcyjność szeregową

$$T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2} \quad \text{- stała czasowa.}$$

Podobnie jak dla pojemności przyłączonej równolegle do linii, fala napięciowa U_2' przechodząca do linii Z_2 ma złagodzone czoło, fala odbita U_2'' ma w pierwszej chwili amplitudę równą $+U_1'$ (indukcyjność L stanowi w pierwszej chwili przerwę dla prądu fali prostokątnej). Łagodzenie czoła fali napięciowej za dławikiem ma znaczenie w ochronie przeciwprzepięciowej. Jednak przed dławikiem napięcie podwyższa się aż do podwójnej wartości fali pierwotnej U_1' .

6. Wielokrotne odbicie fal, zagadnienie eliminacja impedancji falowej

Gdy pewien odcinek linii Z_2 znajduje się pomiędzy innymi liniami Z_1 i Z_3 , wówczas dochodzi do wielokrotnych odbić fal w obydwu węzłach a fale odbite mają wpływ na przebieg fal wypadkowych. Po kilku odbiciach, amplituda fali wypadkowej przyjmuje wielkość ustaloną (gdy fala pierwotna ma kształt prostokątny). Amplituda końcowa jest równa fali przepuszczonej np. do linii Z_3 w takim przypadku jak gdyby linie Z_1 i Z_3 były bezpośrednio ze sobą połączone (jak gdyby linii Z_2 nie było).

Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wroclawska 1980, rozdz. 12
- [2] Stryzowski S., Paciorek Z., Ćwiczenia laboratoryjne wysokonapięciowe. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1999

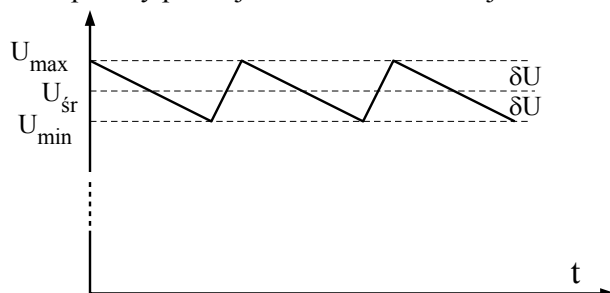
PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA III

WYTWARZANIE I POMIAR NAPIĘCIA STAŁEGO

1. Wstęp

Pierwsze źródła wysokiego napięcia stałego zostały zbudowane już w XVIII wieku jako maszyny elektrostatyczne. Ich udoskonalona w 1931 roku wersja znana jest pod nazwą generatora Van de Graafa. Największy generator tego typu na napięcie 25 MV zbudowano w Oak Ridge National Laboratory w USA. Generatory elektrostatyczne mają jednak bardzo małą moc i dlatego rzadko są stosowane.

Powszechnie stosowanym sposobem wytwarzania wysokiego napięcia stałego jest prostowanie wysokiego napięcia przemiennego. Najprostszym przekształtnikiem jest układ z jednym prostownikiem i kondensatorem, w którym prostowanie odbywa się w co drugim półokresie napięcia zasilającego. W półokresie, gdy prostownik nie przewodzi prądu, kondensator wygładzający rozładowuje się częściowo przez rezystancję obciążenia. Napięcie wyprostowane ulega wahaniom, wzrasta gdy prostownik przewodzi prąd a następnie zmniejsza się. Amplituda pulsacji to połowa różnicy pomiędzy wartością najwyższą a najniższą napięcia (rys. 1). Współczynnik pulsacji δU to iloraz amplitudy pulsacji do wartości średniej.

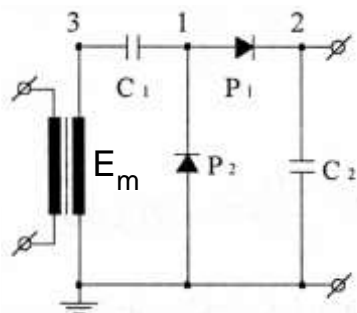


$$\delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2 \cdot U_{\text{sr}}}$$

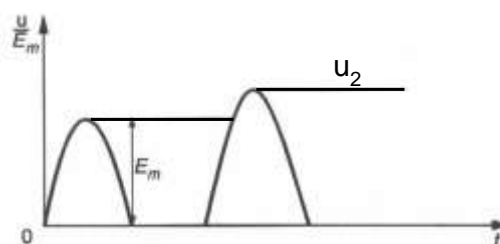
Rys. 1. Wyznaczanie współczynnika pulsacji napięcia stałego

2. Układ Greinachera

Heinrich Greinacher zbudował już w 1920 ciągle popularny układ generatora napięcia stałego (rys. 2). Po załączeniu przemiennego napięcia zasilającego, po kilku cyklach ładowania, napięcie stałe na wyjściu układu (na pojemności C2) osiąga wartość równą dwóm amplitudom napięcia zasilającego (rys. 3). Z układu Greinachera buduje się wielostopniowe generatory umożliwiające wytworzenie wysokiego napięcia stałego rzędu kilku MV ze stosunkowo niewielkich napięć przemiennych.



Rys. 2. Generator napięcia stałego Greinachera



Rys. 3. Przebieg zmian napięcia na pojemności C2. E_m – wartość szczytowa siły elektromotorycznej transformatora

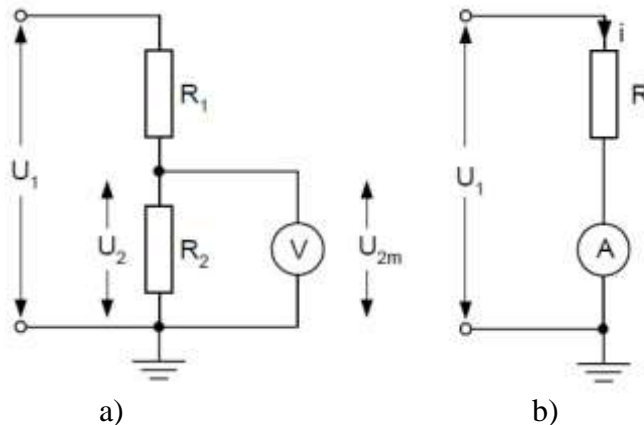
3. Pomiar napięcia stałego

Wysokie napięcie stałe można mierzyć bezpośrednio iskiernikiem kulowym lub woltomierzem elektrostatycznym. Dla napięć wyższych od 250 kV można zastosować specjalny iskiernik prętowy opisany w PN-92/E-04060.

Dzielniki rezystancyjne lub rezystory szeregowe służą do pomiarów pośrednich wysokiego napięcia stałego. Przekładnia dzielnika wynosi:

$$g = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (1)$$

Stosuje się bardzo dużą rezystancję gałęzi wysokonapięciowej w celu uniknięcia obciążenia źródła mierzonego napięcia i nadmiernego nagrzewania dzielnika. Do pomiaru napięcia w gałęzi niskonapięciowej używa się mierników elektrostatycznych lub elektronicznych o bardzo dużej rezystancji wejściowej.



Rys. 4. Układy do pomiaru napięć stałych, a – dzielnik rezystancyjny, b – z rezystorem szeregowym

Gałąź wysokonapięciowa dzielnika często jest wykorzystywana jako rezystor szeregowy do pomiaru napięcia stałego z zastosowaniem miliamperomierza magnetoelektrycznego lub elektronicznego (rys. 4b). Średnia wartość mierzonego napięcia wynosi

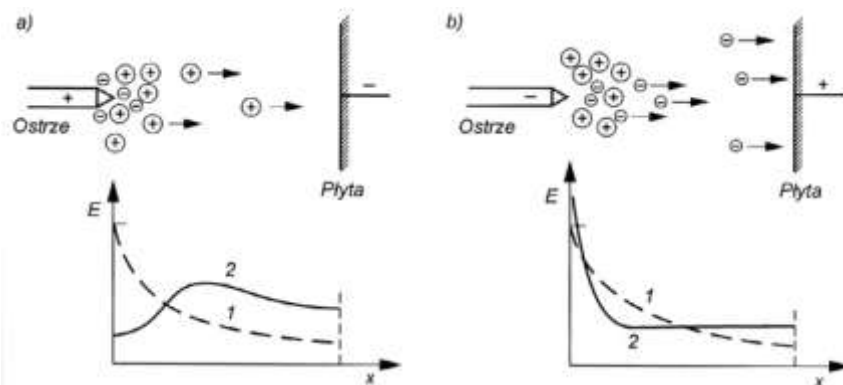
$$U_{sr} = I_{sr} \cdot R \quad (2)$$

4. Wpływ biegunowości na wytrzymałość układu ostrze-płyta

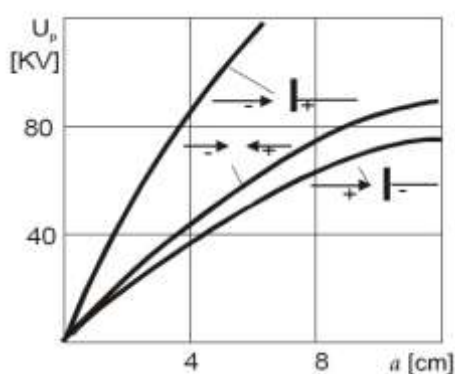
Pole elektryczne jest bardzo nierównomierne, przy ostrzu natężenie jest znacznie większe niż w pozostałej części przestrzeni międzyelektrodowej – niezależnie od biegunowości napięcia. Dlatego początkowe wyładowanie rozwija się przy ostrzu. Ze zjonizowanej przestrzeni usuwane są elektrony ponieważ mają większą ruchliwość niż ciężkie jony dodatnie. W rezultacie w pobliżu ostrza powstaje przewaga ładunku dodatniego oddziałującego na pole elektryczne wytwarzane przez napięcie zasilające.

Gdy ostrze ma potencjał dodatni, pole od ładunku przestrzennego osłabia pole zewnętrzne w pobliżu ostrza a wzmacnia pole na drodze między ładunkiem przestrzennym a płytą (rys. 5a). Gdy ostrze ma potencjał ujemny pole od ładunku przestrzennego działa odwrotnie (rys. 5b). Procesy te wpływają zarówno na napięcie początkowe U_0 , przy którym pojawia się widoczne wyładowanie świetlące jak i na napięcie przebicia. Przy ostrzu dodatnim rozwój wyładowania jest ułatwiony dzięki zwiększeniu pola w kierunku elektrody płaskiej i dlatego napięcie przeskoku U_p^+ jest niższe od napięcia przeskoku w przypadku ostrza ujemnego U_p^- .

$$U_p^+ < U_p^-.$$



Rys. 5. Rozkład pola elektrycznego pomiędzy elektrodą ostrzową i płaską. a) – ostrze dodatnie, b) – ostrze ujemne, 1 – rozkład bez udziału pola od ładunku przestrzennego, 2 – rozkład z udziałem pola od ładunku przestrzennego



Rys. 6. Zależność napięcia przebicia w układzie ostrze-płyta od biegunowości oraz w układzie ostrze-ostrze dla małych odległości elektrod.

Układ ostrze-płyta z elektrodą o biegunowości dodatniej charakteryzuje się najmniejszą wytrzymałością elektryczną i dlatego ma duże znaczenie w technice wysokich napięć. Wytrzymałość powietrza w tym układzie determinuje wymiary odstępów izolacyjnych w liniach przesyłowych wysokich napięć.

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA IV

WYTRZYMAŁOŚĆ POWIETRZA W POLU RÓWNOMIERNYM I SŁABO NIERÓWNOMIERNYM

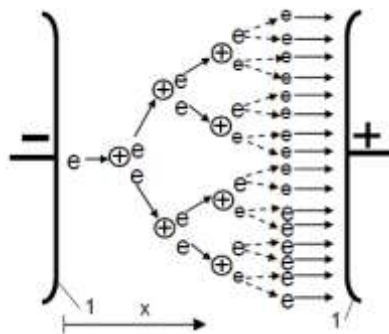
Wytrzymałość powietrza zależy od szeregu czynników jak: rozkład pola elektrycznego (kształtu i konfiguracji elektrod, rodzaju napięcia (przemienne, stałe, udarowe), biegunowości i warunków atmosferycznych. Wytrzymałość określona przy napięciu przemiennym niskiej częstotliwości (np. 50 Hz) nazywana jest wytrzymałością statyczną. O przeskoku decyduje najwyższa wartość chwilowa napięcia, dlatego napięcie przeskoku podaje się zazwyczaj w wartościach szczytowych (kV_{max}). Jeżeli pomiary wykonywane są przy nieznieskształconym napięciu sinusoidalnym, wówczas dopuszczalne jest operowanie wartościami skutecznymi.

1. Wytrzymałość powietrza w układzie płaskich elektrod

Pomiędzy płaskimi elektrodami z odpowiednio wyprofilowanymi krawędziami pole elektryczne jest równomierne. Przebiecia gazu w tych warunkach, przy małym odstępnie elektrod opisuje mechanizm Townsenda. John Townsend rozpoczął badania przewodnictwa i wyładowań w gazach w 1901 w Oxfordzie. Pod wpływem pola elektrycznego wolny elektron nabywa energii kinetycznej. Wskutek zderzeń z innymi molekułami może dojść do ich jonizacji – powstania dodatniego jonu oraz wolnego elektronu. Proces ten rozwija się lawinowo a liczba wolnych elektronów pomiędzy elektrodami może być opisana równaniem (1)

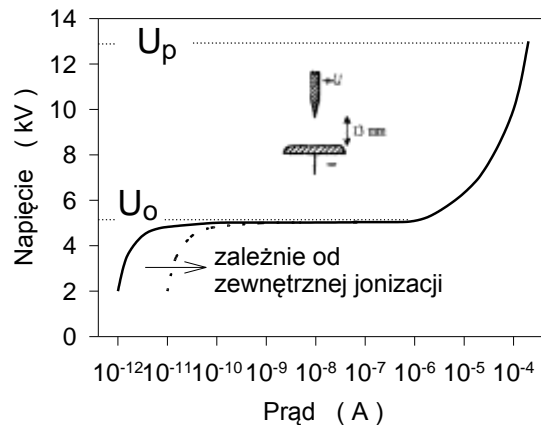
$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \quad (1)$$

gdzie n_0 - jest liczbą wolnych elektronów przy katodzie (rys. 1), $n_0 = n(x = 0)$
 α - współczynnik jonizacji zderzeniowej (Townsenda)



Rys. 1. Rozwój lawiny elektronowej w polu równomiernym

Poniżej progu jonizacji prąd w układzie jest bardzo mały ponieważ nośników ładunku w powietrzu jest mało. Jednak gdy napięcie przekroczy wartość początkowego napięcia jonizacji U_0 , ilość jonów i elektronów wzrasta co skutkuje w szybkim wzroście prądu (rys. 2). Dalszy wzrost napięcia powoduje przebiecie – gwałtowny wzrost prądu do wartości prądu zwarciovego źródła napięcia. Rysunek 2 pokazuje charakterystykę napięciowo-prądową układu ostrze- płyta w powietrzu atmosferycznym (odległość elektrod 13 mm, $p = 1000$ hPa). Dla układu płyta-płyta charakterystyka ta jest bardzo podobna.

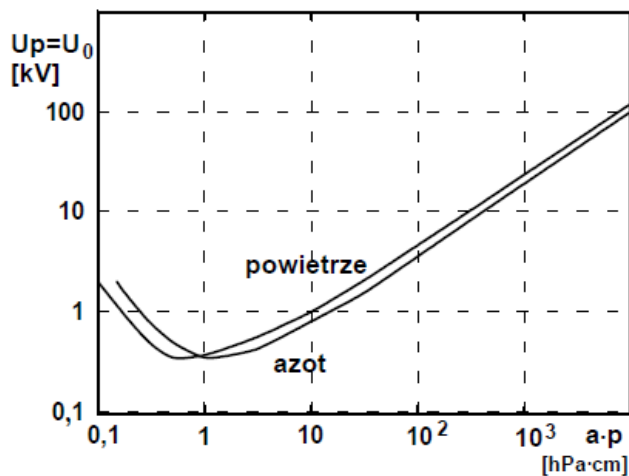


Rys. 2. Charakterystyka napięciowo-prądowa dla układu ostrze- płyta [1]

W polu równomiernym napięcie początkowe jonizacji U_0 jest równe napięciu przebicia U_p i jest opisane prawem Paschena. Najprostsza forma prawa Paschena mówi, że napięcie początkowe jonizacji U_0 jest funkcją iloczynu ciśnienia gazu p i odległości elektrod a :

$$U_0 = f(p \cdot a). \quad (2)$$

Zależność ta jest nieliniowa i ma dla danego gazu charakterystyczne minimum. Dla powietrza atmosferycznego najmniejsze napięcie $U_0 = 360 \text{ V}$ występuje przy iloczynie $p \cdot a = 67 \text{ Pa} \cdot \text{cm}$. Co oznacza, że przy ciśnieniu atmosferycznym minimalne napięcie U_0 obserwuje się przy bardzo małej odległości elektrod wynoszącej $5 \mu\text{m}$ (rys. 3).



Rys. 3. Krzywe Paschena dla powietrza i azotu

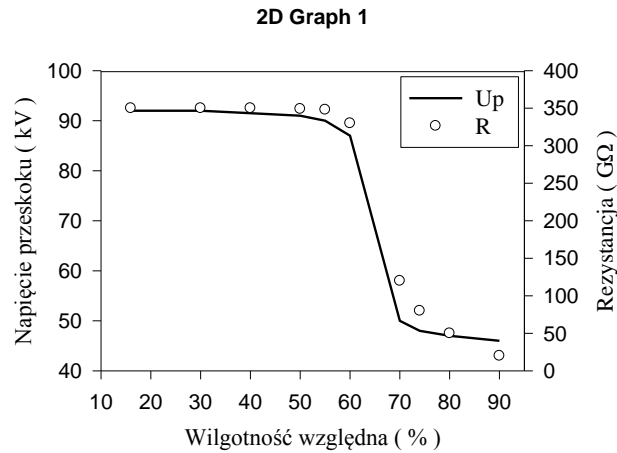
Ważną konsekwencją prawa Paschena jest fakt, że napięcie przebicia w układzie płyta-płyta nie jest idealnie proporcjonalne do odległości elektrod. Przy bardzo małym odstępnie poniżej 1 mm natężenie pola przy przeskoku jest większe od $40 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ a przy odległości 10 cm – $26 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$.

2. Wpływ dielektryka stałego na wytrzymałość

Po umieszczeniu dielektryka stałego pomiędzy płaskimi elektrodami wytrzymałość układu ulega zmniejszeniu. Napięcie przeskoku wzdłuż powierzchni dielektryka jest mniejsze niż napięcie przebicia powietrza bez obecności materiału stałego. Wprowadzenie dielektryka stałego, np. cylindrycznego izolatora między płaskie elektrody powoduje zmianę rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej, zależy to od stanu powierzchni dielektryka. Na powierzchni dielektryka

adsorbuje cienką warstwę powietrza (rys. 4).

zależy od wilgotności



Rys. 4. Napięcie przeskoku i rezystancja cylindrycznego walca z żywicy epoksydowej o wysokości 4 cm umieszczonego pomiędzy płaskimi elektrodami [2].

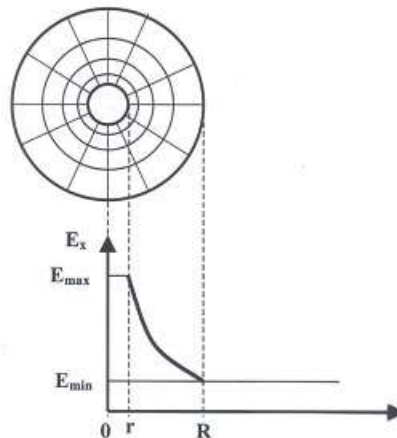
Dielektryk stały powinien ściśle przylegać do elektrod. Jeśli pomiędzy dielektrykiem a elektrodą istnieje szczelina, natężenie pola w tym obszarze jest większe. Wyładowanie niezupełne w szczelinie inicjuje przeskok obniżając wytrzymałość układu.

3. Wytrzymałość w układzie walców koncentrycznych

W układzie walców koncentrycznych natężenie pola elektrycznego w punkcie odległym o x od środka układu ($r < x < R$) wynosi

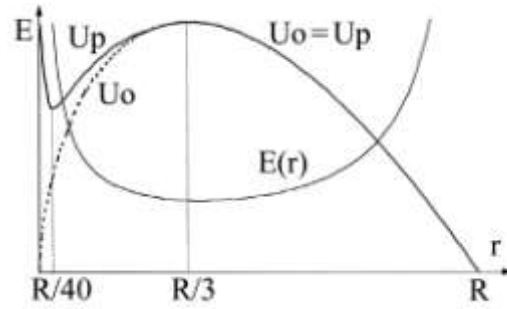
$$E(x) = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (3)$$

Przy elektrodzie o mniejszym promieniu r występuje najwyższe natężenie pola a przy elektrodzie o promieniu większym R natężenie pola jest najmniejsze (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie walców koncentrycznych

Zależność (3) posiada minimum gdy $R/r = 2,718$ i dlatego napięcie przeskoku jest najwyższe dla $r = R/3$ (rys. 6). Natomiast minimum napięcia przebicia występuje dla $r = R/40$. Przy bardzo cienkiej wewnętrznej elektrodzie ($r < R/40$) napięcie wzrasta wskutek występowania zjawiska zwanego „super koroną” (intensywne wyładowania niezupełne powodują zmniejszenie natężenia pola przy elektrodzie wewnętrznej). W zakresie $R/4 < r < R$ wyładowania niezupełne nie występują gdyż pole staje się słabo równomierne ($U_0 = U_p$).



Rys. 6. Napięcie początkowe wyładowań elektrycznych U_0 , napięcie przebicia U_p oraz średnie natężenie pola elektrycznego bezpośrednio przed przeskokiem w zależności od promienia wewnętrznego.

Literatura

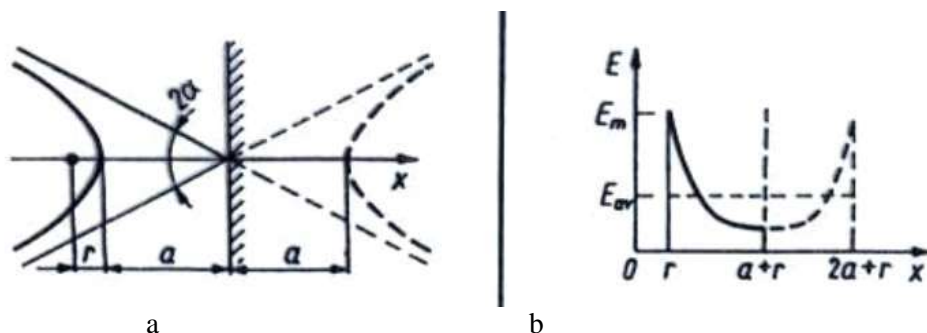
- [1] Goldman M., Sigmond R.S., Corona and insulation. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2, 1982, pp. 90-105
- [2] Link W-D., Ueberschlag von Stuetzisolatoren in Luft in Abhaengigkeit von Temperatur und Luftfeuchte. Praca doktorska, Uniwersytet w Stuttgart 1975

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA V

WYTRZYMAŁOŚĆ POWIETRZA W POLU NIERÓWNOMIERNYM

1. Iskiernik ostrze-ostrze

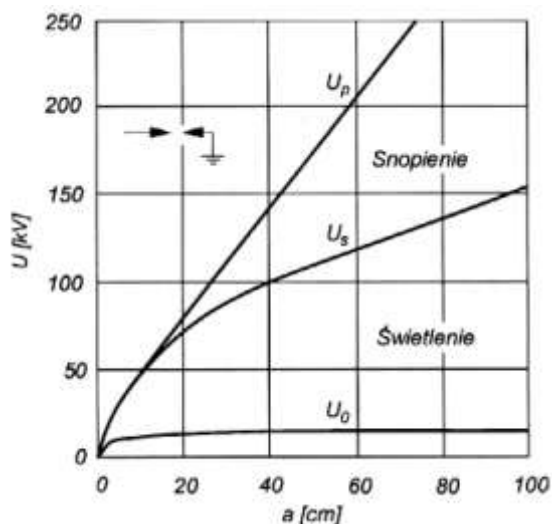
Elektrody ostrzowe można modelować jako dwie hiperboloidy (rys. 1a) co umożliwia analityczne przedstawienie rozkładu pola wzdłuż osi symetrii (rys. 1b) oraz obliczenie współczynnika nierównomierności pola.



Rys. 1. Układ elektrod ostrze-ostrze. a) Ostrze hiperboloidalne – płaszczyzna lub drugie ostrze, b) rozkład natężenia pola

W układzie o polu bardzo nierównomiernym, przebicie poprzedzone jest innymi formami wyładowań: światlenie, powstające przy napięciu początkowym U_0 , mające postać świecącej plamki przy ostrzu, snopienie, rozpoczynające się przy napięciu oznaczanym jako U_s , przy czym $U_s > U_0$.

W miarę podnoszenia napięcia obszar światlenia powiększa się i pojawiają się świecące nitki (snopienie). Tę formę wyładowań można obserwować przy odstępach elektrod większym od 20 cm (rys. 2).



Rys. 2. Napięcie początkowe światlenia U_0 , napięcie początkowe snopienia U_s i napięcie przebicia jako funkcja odległości między elektrodami w układzie ostrze-ostrze

Dla niesymetrycznego układu ostrze – ostrze (jedna elektroda uziemiona) przy napięciu przemiennym 50 Hz i odległości elektrod większej od 8 cm, napięcie przebicia opisuje wzór empiryczny BBC (od nazwy szwajcarskiej firmy Brown Boveri Company)

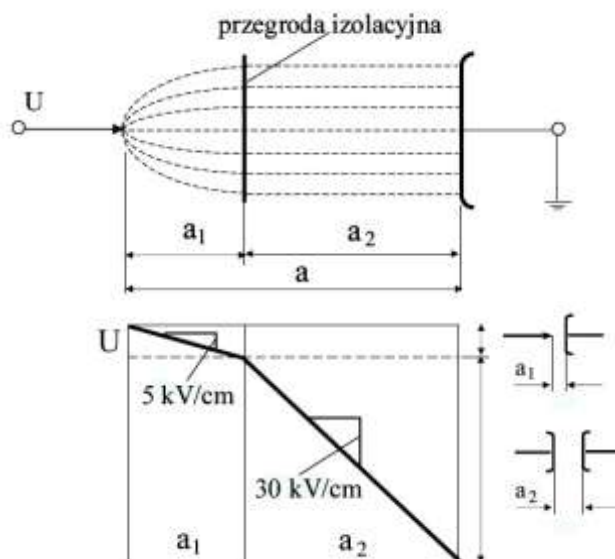
$$U_p = 3,16 \cdot a + 14 \quad (kV_{rms}) \quad (1)$$

gdzie a jest odległością między elektrodami w cm.

2. Cienkie bariery dielektryczne

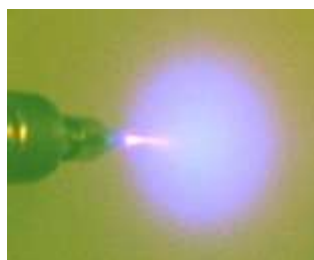
Przegrody izolacyjne stanowią jeden z kilku sposobów zwiększania wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych. Do tych metod należą: poprawa rozkładu pola elektrycznego (pierścienie lub ekrany sterujące, zaokrąglanie ostrych krawędzi, szkliva półprzewodzące), stosowanie materiałów o wyższej wytrzymałości elektrycznej, podwyższenie ciśnienia gazu, wykorzystanie próżni, stosowanie gazów dielektrycznych (SF_6) i pokrywanie elektrod cienkimi warstwami dielektrycznymi.

Cienkie bariery izolacyjne są stosowane w układach o nierównomiernym polu z izolacją gazową lub olejową. Cienkie przegrody izolacyjne nie mają wpływu na pole elektryczne generowane przez napięcie zasilające. Dlatego nie mają również wpływu na napięcie początkowe jonizacji (światlenia). Ich działanie polega na zmianie rozmieszczenia ładunków poprzez utrudnienie ich swobodnego ruchu. Elektryczna wytrzymałość barier ma pomijalny wpływ na wytrzymałość układu izolacyjnego. W układzie ostrze-płyta oddziaływanie barier jest szczególnie istotne gdy są one położone w pobliżu ostrza (rys. 3).



Rys. 3. Przegroda izolacyjna w układzie ostrze-płyta i rozkład napięcia po obu stronach bariery [1]

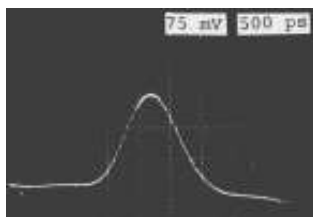
Jony dodatnie generowane przez wyładowania z ostrzy osiadają na barierze wyrównując rozkład pola pomiędzy barierą a elektrodą płaską (rys. 3). Dlatego największą wytrzymałość uzyskuje się po umieszczeniu bariery w pobliżu ostrza. Niestety, stosowanie przegród przy napięciu stałym i udarowym ma znaczenie tylko przy dodatniej biegunowości ostrza. W układzie ostrze-ostrze szczególnie efektywne jest umieszczenie dwóch barier w pobliżu elektrod.



Rys. 4. Wyładowanie elektryczne w układzie ostrze-ostrze uderzające w barierę w postaci zwykłej kartki papieru

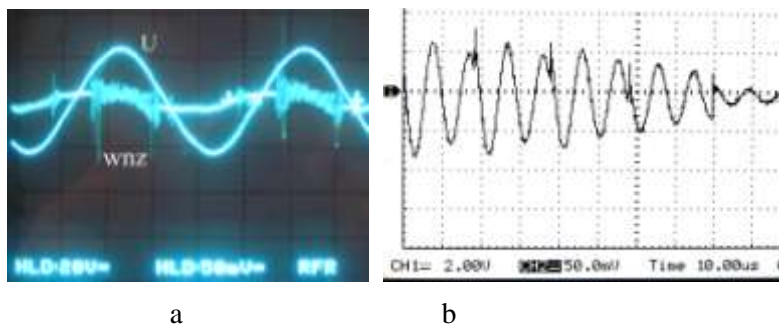
3. Układ do detekcji wyładowań niezupełnych

W ćwiczeniu wyznacza się napięcie początkowe jonizacji dwoma metodami, najprostszą – optyczną i metodą elektryczną – obserwując pojawienie się impulsów pochodzących od wyładowań niezupełnych na oscyloskopie. Po zwiększeniu napięcia do wartości U_0 , powietrze przy elektrodzie ostrzowej ulega jonizacji. Rozwojowi każdej lawiny elektronowej towarzyszy krótki impuls prądu o bardzo stromym czole (rys. 5). Czas czoła jest rzędu 1 ns. Przed kilkudziesięciu laty nie można było rejestrować tak krótkich sygnałów przy pomocy ówczesnych oscyloskopów mających pasmo przenoszenia w zakresie MHz. Do tego potrzebne są znacznie szybsze oscyloskopy, zdolne do rejestracji sygnałów o częstotliwości w zakresie GHz.



Rys. 5. Oscylogram impulsu wyładowania niezupełnego z zastosowaniem detekcji z ultra szerokim pasmem palącego się w powietrzu w układzie ostrze-płyta [2]

Jeśli mierzy się spadek napięcia na impedancji RLC połączonej z iskiernikiem, wówczas oscyloskop z wąskim pasmem jest w stanie rejestrować impulsy wywołane przez wyładowania niezupełne. Impuls prądowy od lawiny elektronowej wywołuje na impedancji drgania o częstotliwości rezonansowej zależnej od indukcyjności L i pojemności C . Jak widać z oscylogramu na rys. 6b (zastosowano oscyloskop cyfrowy z częstotliwością próbkowania 500 Msa/s) okres oscylacji wynosi 10 μ s, zatem częstotliwość wynosi 100 kHz. Na oscyloskopie pracującym w trybie analogowym łatwo można obserwować piki wywołane przez lawiny elektronowe. Przy zastosowaniu stałej czasowej rzędu 5 ms można obserwować położenie pików w stosunku do fazy napięcia zasilającego (rys. 6a).



Rys. 6. Oscylogramy wyładowań niezupełnych (koronowych) w układzie ostrze-ostrze. a) napięcie i impulsy wyładowań niezupełnych, podziałka czasu 5 ms, b) impuls wyładowań niezupełnych, podziałka czasu 10 μ s.

Literatura

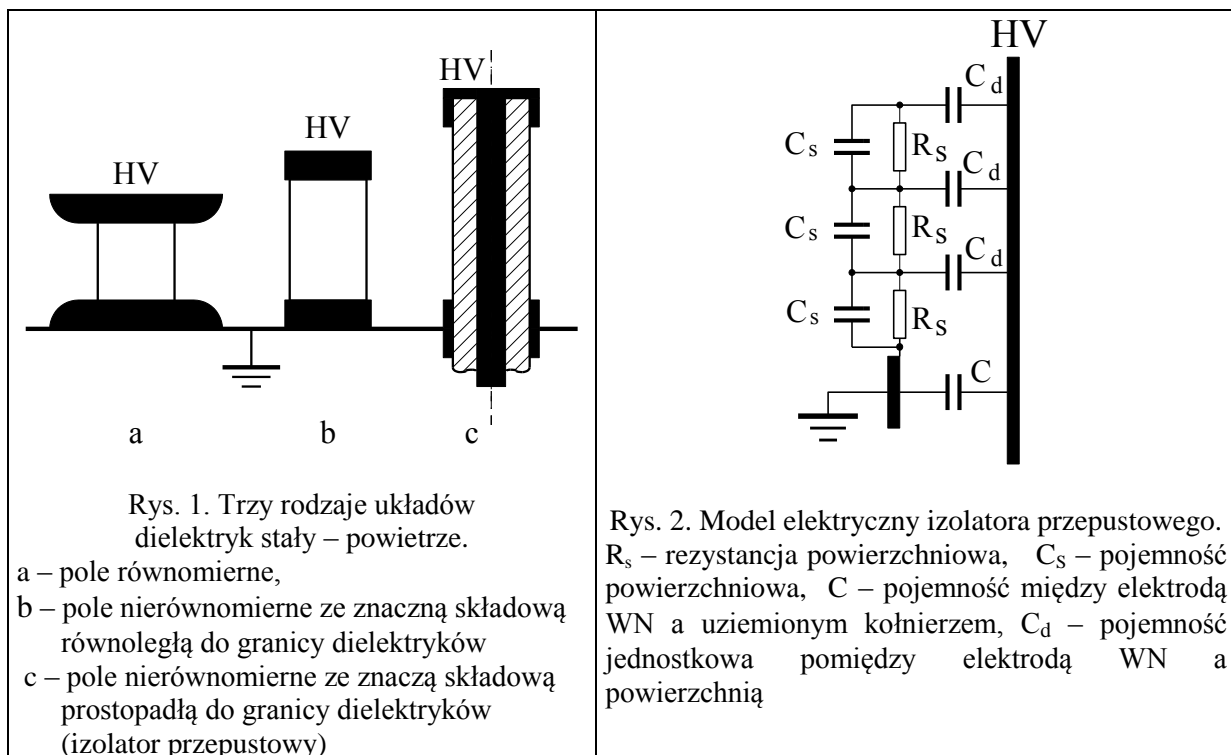
- [1] Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wydawnictwo AGH 2003
- [2] Boggs S.A., Stone G.S., Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2, 1982, pp. 143-150

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA VI

WYTRZYMAŁOŚĆ POWIERZCHNIOWA

1. Wstęp

Rozwój wyładowań na powierzchni izolatorów zbudowanych z dielektryków stałych zależy od rozkładu pola. Układ izolacyjny złożony z dielektryka stałego i otaczającego go powietrza można podzielić na 3 najważniejsze przypadki (rys. 1).



Rozwój wyładowań powierzchniowych w polu równomiernym (rys. 1a) i w polu nierównomiernym (rys. 1b) jest podobny do rozwoju wyładowań pomiędzy elektrodami po usunięciu dielektryka stałego. Jednak napięcie przeskoaku (wzdłuż powierzchni dielektryka stałego) jest istotnie niższe od napięcia przebicia powietrza pomiędzy elektrodami (bez dielektryka stałego). Materiał dielektryka stałego powoduje dodatkową deformację pola co zależy od przenikalności dielektrycznej, rezystancji powierzchniowej (zwłaszcza zabrudzenia), ładunku powierzchniowego oraz od jakości kontaktu pomiędzy elektrodą a dielektrykiem stałym.

Wyładowania na izolatorze przepustowym palą się w odmienny sposób z powodu znacznej składowej pola elektrycznego prostopadłej do granicy dielektryka stałego i powietrza. Wyładowania te nazywają się ślizgowymi ponieważ przylegają ściśle do powierzchni izolatora.

Rozkład napięcia na izolatorze przepustowym można wyjaśnić w oparciu o jego elektryczny model pokazany na rys. 2. W przypadku czystej powierzchni (duże rezystancje powierzchniowe), największe natężenie pola występuje w pobliżu uziemionej elektrody (kołnierza). Natężenie pola zależy od stosunku przenikalności dielektrycznej materiału stałego i powietrza, grubości dielektryka stałego a

także od kształtu elektrod. Jonizacja gazu rozpoczyna się w obszarze o największym natężeniu pola przy napięciu U_0 . Natężenie emisji fioletowo-niebieskiego światła (wyładowanie jarzeniowe) wzrasta wraz z przyłożonym napięciem. Przy pewnej wartości napięcia oznaczanej jako napięcie początkowe wyładowań ślizgowych zauważyć można jaśniejszą iskrę koloru pomarańczowego i usłyszeć towarzyszący jej charakterystyczny trzask. Iskry ślizgowe są zjonizowane w wysokim stopniu, ich prąd jest większy od prądu wyładowania jarzeniowego. Prąd ten płynie do przeciwnej elektrody przez pojemność C_d (rys. 2). Ponieważ rezystancja wyładowań ślizgowych jest mała to spadek napięcia wzdłuż ich długości jest mały i dlatego potencjał na ich zakończeniu jest wysoki. Stwarza to korzystne warunki do ich dalszego rozwoju. Duża wartość pojemności C_d zwiększa również prąd i umożliwia przeskok przy napięciu znacznie mniejszym od napięcia przeskoku izolatora wsporczego.

Prąd iskry ślizgowej płynącej przy elektrodzie uziemionej można przedstawić w postaci następującej sumy:

$$i_s = C_s \cdot \frac{dU_s}{dt} + U_s \cdot \frac{dC_s}{dt} \quad (1)$$

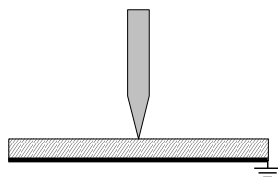
gdzie:

C_s – pojemność całkowita poniżej iskry zwiększająca się wraz z wydłużaniem się wyładowania,
 U_s – napięcie na pojemności C_s .

Napięcie U_s jest mniejsze od napięcia całkowitego pomiędzy elektrodą wysokonapięciową i elektrodą uziemioną z powodu spadku napięcia wzdłuż iskry. Łatwo zrozumieć dlaczego przy napięciu o dużej częstotliwości lub przy napięciu impulsowym, propagacja iskry ślizgowej jest łatwiejsza niż przy wolnozmiennym napięciu o częstotliwości 50 Hz.

2. Jakościowy opis wyładowań ślizgowych

Maksymilian Toepler do badań wyładowań ślizgowych przeprowadzanych w latach 1920-tych zastosował układ pokazany na rys. 3. W tym układzie, ostro zakończona elektroda wysokonapięciowa oddzielona jest od uziemionej metalowej płyty przez warstwę dielektryka.



Rys. 3. Układ ostrze-płyta Toeplera do badania wyładowań ślizgowych [1].

Składowa pola elektrycznego prostopadła do granicy powietrze-dielektryk E_p jest większa niż składowa równoległa E_t . Wyładowania ślizgowe są przyciskane do powierzchni dielektryka przez składową prostopadłą pola.

Im cieńsza jest płyta izolacyjna i im większa jest jej przenikalność dielektryczna ϵ_r , to pole jest bardziej nierównomierne. Gdy pole elektryczne w powietrzu przekroczy wartość $30 \text{ kV}_{\text{peak}}/\text{cm}$ wówczas następuje jonizacja gazu i związana z tym procesem emisja światła. Napięcie początkowe jonizacji U_0 jest odwrotnie proporcjonalne do pojemności jednostkowej C_d (rys.2). Należy podkreślić, że napięcie początkowe jonizacji zależy nie tylko od pojemności C_d ale także od wymiarów i kształtu elektrody wysokonapięciowej w modelu Toeplera. Natomiast napięcie U_0 izolatora przepustowego zależy również od kształtu i wymiarów uziemionej elektrody (kołnierza). W literaturze znane są równania opracowane przez Kappellera, Haefely'ego i Pappena na napięcie początkowe jonizacji U_0 .

Poniższy wzór jest jedną z takich zależności ważną dla pojemności jednostkowej większej niż 0,25 pF/cm² [2].

$$U_o = \frac{1,06 \cdot 10^{-4}}{C_p^{0,44}} \quad [\text{kV}] \quad (2)$$

gdzie: C_p jest pojemnością jednostkową, która powinna być większa od 0,25 pF/cm².

Jeśli elektroda uziemiona nie ma ostrych krawędzi, wówczas emisja świetlna w kolorze fioletowym rozpoczyna się bezpośrednio na granicy metalowy kołnierz-powierzchnia dielektryka. Przy wyższym napięciu wyładowanie przybiera postać niebieskich nitek. Przy jeszcze wyższym napięciu U_{sl} rozpoczyna się rozwój wyładowań ślizgowych mających postać jaśniejszych, żółto-pomarańczowych iskerek, którym towarzyszą charakterystyczne trzaski. Wzór na napięcie początkowe wyładowań ślizgowych nazywa się wzorem Toeplera.

$$U_{sl} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C^{0,44}} \quad [\text{kV}] \quad (3)$$

Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych (nie tak jak napięcie początkowe jonizacji) nie zależy od geometrii uziemionej elektrody. Maksymalna długość iskier ślizgowych opisuje poniższe równanie [1]:

$$l = k \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[20]{\frac{du}{dt}} \quad [\text{cm}] \quad (4)$$

gdzie: k - stała, C - pojemność w [F /cm²], U - napięcie w [kV], du/dt - charakteryzuje szybkość zmian napięcia w [kV/μs]

Napięcie przeskoku można obliczyć ze wzoru (4) podstawiając w miejsce długości iskier ślizgowych l odległość elektrod L.

$$U_F = 5 \sqrt[5]{\frac{L}{k \cdot C^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt[20]{\frac{du}{dt}}} \quad [\text{kV}] \quad (5)$$

Wartość pierwiastka $\sqrt[20]{\frac{du}{dt}}$ zmienia się stosunkowo nieznacznie przy dużych zmianach narostu napięcia: np. z 0,7 do 1,26 gdy narost napięcia zmienia się z 0,001 do 100 kV/μs. Przyjmując, że $\sqrt[20]{\frac{du}{dt}} \cong 1$ oraz że, pojemność jednostkową pomiędzy elektrodą WN a uziemionym kołnierzem można obliczyć ze wzoru (6),

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{R \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (6)$$

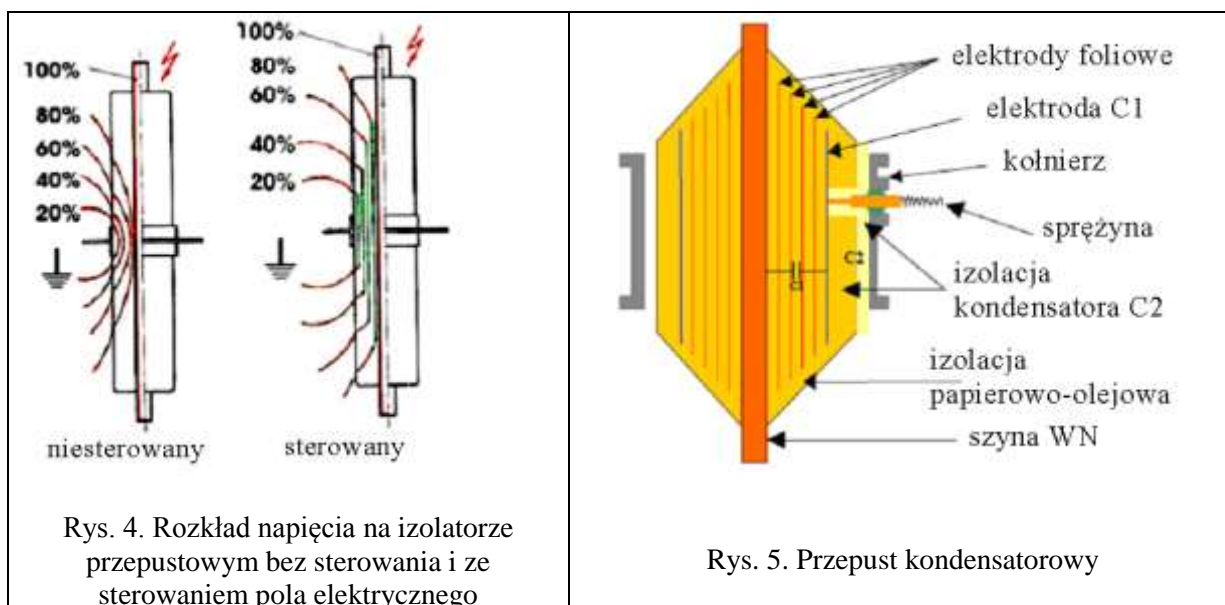
wówczas równanie (5) można napisać w następującej postaci [3]:

$$U_F = K \cdot L^{0,2} \cdot \left(\frac{R \cdot \ln \frac{R}{r}}{\epsilon_r} \right)^{0,4} \quad (7)$$

Gdzie stała K zależy od rodzaju napięcia (przemienne, udar łączeniowy lub udar piorunowy). Dla warunków eksperymentu przeprowadzanych w ramach ćwiczenia studenckiego, obliczono wartość stałej $K = 43$ (cylindryczny izolator przepustowy o promieniu zewnętrznym 7,5 cm, promieniu wewnętrznym $r = 5$ cm, odległość elektrod od 10 do 30 cm a napięcie mierzone w kV_{rms}).

3. Izolatory przepustowe

Najprostszy izolator przepustowy ma cylindryczny kształt o długości i promieniu wystarczającym do zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej. Te wymiary zależą od wielkości napięcia i od rozkładu napięcia pokazanego na rys. 4 (niesterowany). Dlatego dla wyższych napięć wymiary izolatorów przepustowych stawały się tak duże, że te proste konstrukcje stawały się niepraktyczne. Problem został rozwiązany przez zmianę konstrukcji i wprowadzenie przepustu kondensatorowego pokazanego na rys. 4 (sterowany) i na rys. 5. Izolacja została podzielona na szereg kondensatorów przez specjalne przewodzące folie. Przewodzące folie sterują radialnie polem elektrycznym (obniżają je w pobliżu elektrody wysokonapięciowej) i wzdłuż osi symetrii w celu zwiększenia napięcia przeskoku dla określonych wymiarów izolatora. Izolatory przepustowe kondensatorowe mają znacznie mniejsze wymiary i są stosowane dla napięć wyższych lub równych 110 kV.



4. Przeskok zabrudzeniowy

Gdy rezystancja powierzchniowa izolatora znacznie zmalaże (zazwyczaj na skutek zabrudzenia i zawilgocenia), wówczas napięcie przeskoku nie zależy od rozkładu napięcia wyznaczonego m. in. przez pojemności rozproszenia. Rozkład napięcia zależy wówczas od rozkładu konduktywności powierzchniowej czyli od intensywności zabrudzenia, zawilgocenia i konfiguracji tzw. stref suchych. W warunkach zabrudzeniowych powierzchniowy prąd upływu jest wielokrotnie większy od prądu pojemnościowego przy czystej powierzchni.

Strefy suche powstają w miejscach gdzie gęstość prądu upływu jest największa. Gdy napięcie na strefie suchej przekroczy wytrzymałość elektryczną powietrza nad jej obszarem, wówczas pojawiają się lokalne łuki elektryczne. Wyładowania bezpośrednio przed przeskokiem na czystym izolatorze są zazwyczaj bardzo słabe, ich prąd jest rzędu mikroamperów. Na izolatorach przepustowych prądy te są większe, rzędu 1 mA, natomiast na intensywnie zabrudzonych izolatorach mogą przekroczyć wartość 1 A.

Dlatego układ zasilający do prób zabrudzeniowych izolatorów powinien spełniać specjalne wymagania. Moc i prąd zwarcia transformatora muszą być dostatecznie duże aby nie ograniczać rozwój wyładowań na izolatorze. Innymi słowy, prąd upływu nie powinien powodować znacznych spadków napięcia na impedancji wewnętrznej układu zasilającego. Czyli napięcie na izolatorze podczas próby nie powinno ulegać dużym spadkom.

Stosowany układ zasilający z regulatorem 70 kVA nie spełnia wymagań normy międzynarodowej IEC 60-507 dotyczących prądu zwarcia. Dlatego układ nie może być stosowany w akredytowanym laboratorium do prób zabrudzeniowych a jedynie do celów dydaktycznych.

Sposób nawilgacania warstwy zabrudzeniowej wykorzystywany w ćwiczeniu nie odtwarza dokładnie warunków naturalnych. Po spryskaniu izolatora za pomocą ręcznego nawilzacza, po załączeniu napięcia płynie bardzo duży prąd. Po krótkim czasie powstają strefy suche i pojawiają się intensywne wyładowania na każdej podziałce kloszowej (rys. 6a). Natomiast w naturalnych warunkach izolatory pracują stale pod napięciem roboczym. Nawilgacanie jest często długotrwałe lecz o małej intensywności, np. mgła, mżawka. W takich warunkach mogą wystąpić małe, krótkie wyładowania obejmujące nieznaczny obszar (rys. 6b). Matematyczny model przeskoku zabrudzeniowego opisany jest w ćwiczeniu nr 10.



Rys. 6. Wyładowania na zabrudzonych izolatorach [4]

- a – intensywne wyładowania podczas laboratoryjnej próby metodą “flow on” na izolatorze VKL 75/14
- b – słabe, skoncentrowane wyładowania na zabrudzonym izolatorze LPZs 75/15 w wysokiej wilgotności powietrza

5. Metoda „góra-dół” i metoda serii

Metoda góra-dół i metoda serii stosowane są do wyznaczenia 50% napięcia przeskoku i odchylenia standardowego. Metody te wykorzystywane są najczęściej w próbach zabrudzeniowych izolatorów (wykonywanych zazwyczaj przy napięciu przemiennym 50 Hz) lub próbach układów izolacyjnych przy napięciu udarowym. Aby ocenić wytrzymałość elektryczną izolacji, próby te muszą być wielokrotnie powtarzane.

W metodzie góra-dół badany obiekt poddaje się wielokrotnym próbom napięciowym n razy (zwykle $n > 20$) przy różnych poziomach napięciowych różniących się o stałą wartość ΔU . Próby rozpoczyna

się od stosunkowo małej wartości napięcia, przy której przeskok jest stosunkowo mało prawdopodobny. Następnie zwiększa się poziom napięcia o ΔU . Jeśli przeskok w poprzedniej próbie nie wystąpił, znów zwiększa się napięcie o ΔU . Jeśli jednak wystąpił przeskok – wówczas następną próbę wykonuje się przy napięciu mniejszym o ΔU . Najwyższy poziom napięcia przy którym nie wystąpił żaden przeskok oznacza się jako poziom zerowy U_0 . Krok napięciowy ΔU powinien wynosić 2%-5% spodziewanego 50-procentowego napięcia przeskoku $U_{50\%}$.

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} \pm 0,5 \right) \quad (8)$$

gdzie:

N – mniejsza z dwóch liczb stanowiących sumę przeskoków lub prób, w których przeskok nie wystąpił.

Znak minus odpowiada sytuacji gdy użytecznych przeskoków było więcej.

Znak plus odpowiada sytuacji gdy przeskoków było mniej. Dlatego liczba użytecznych prób powinna być nieparzysta aby nie było trudności z wyznaczeniem znaku we wzorze (8). Użyteczna próba to próba wykonana na poziomie wyższym od U_0 .

$$A = \sum_{i=1}^m i \cdot n_i \quad (9)$$

m – liczba użytecznych poziomów napięciowych

n_i – liczba prób na poziomie i , przy których wystąpiło zdarzenie odpowiadające wyborowi N

Odchylenie standardowe z prób szacuje się z następującej zależności:

$$S = 1,62 \cdot \Delta U \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,03 \right) \quad (10)$$

$$B = \sum_{i=1}^m i^2 \cdot n_i \quad (11)$$

Próba góra-dół wykonywana jest na poziomach bliskich 50-procentowego napięcia przeskoku gdzie krzywa prawdopodobieństwa przeskoków jest symetryczna w stosunku do $U_{50\%}$. Dlatego wartość $U_{50\%}$ można obliczyć jako średnią arytmetyczną z wartości napięć poszczególnych prób z uwzględnieniem poziomu U_0 .

$$U_{50\%} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k U_i \quad (12)$$

gdzie k - liczba użytecznych prób napięciowych z uwzględnieniem prób na poziomie U_0 .

W próbach wykonywanych metodą serii do badanego obiektu doprowadza się kolejno 10 – 20 narażeń napięciowych o jednakowej amplitudzie (np. udarów piorunowych) i określa się prawdopodobieństwo przeskoku na tym poziomie ze stosunku liczby przeskoków do liczby prób. Następnie wykonuje się drugą serię pomiarów przy napięciu większym lub mniejszym o ΔU . Wartości prawdopodobieństwa określone na różnych poziomach napięciowych wyznaczają krzywą prawdopodobieństwa przeskoków, która w skali rozkładu normalnego (na siatce Gaussa) jest linią prostą. Pozwala to łatwo określić 50-procentowe napięcie przeskoku i odchylenie standardowe S z

próby. Siatka Gaussa i metoda wyznaczania $U_{50\%}$ i odchylenia standardowego S zostały pokazane w instrukcji do ćwiczenia IX (rys. 6).

Literatura

- [1] Toepler M., Ueber die physikalische Grundgesetze der in der Isolatorentechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen. Archiv fuer Elektrotechnik 1921, Heft 5/6, S. 157-185.
- [2] Gacek Z. Technika wysokich napięć. Wydanie III, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 1999, pp. 140.
- [3] Chrzan K.L., Trzęsicki P., Creeping discharges. 5th Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie OWD, Istebna-Zaolzie, 2003.
- [4] Chrzan K.L., Moro F., Concentrated discharges and dry bands on polluted outdoor insulators. IEEE Trans. on Power Delivery, 2007 vol. 22, No. 1, pp. 466-471.
- [5] Mosiński F., Metody statystyczne w technice wysokich napięć. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1995
- [6] Zhang Z., Jiang X., Sun C., Hu J., Huang H., Study of the influence of the test methods on DC pollution flashover voltage of insulator strings and its flashover process. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, Dec. 2010, pp. 1787-1795

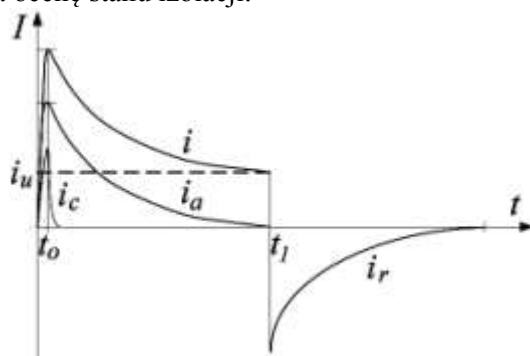
PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA VII

POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH I WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Pomiary współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ i wyładowań niezupełnych są podstawowymi metodami diagnostycznymi izolacji wysokonapięciowej. Do innych nieniszczących metod testujących należą: pomiar rezystancji, pomiar prądów polaryzacji i depolaryzacji, pomiar napięcia powrotnego, analiza gazów rozpuszczonych w oleju, pomiar temperatury za pomocą kamer termowizyjnych. Pogarszający się stan izolacji jest jedną z najczęstszych przyczyn uszkodzeń aparatury elektrycznej. Wielu awariom można zapobiec stosując systematyczne badania profilaktyczne.

1. Straty dielektryczne

Zjawisko stratności dielektrycznej można wyjaśnić rozważając dołączenie napięcia stałego do kondensatora z dielektrykiem stałym. Wówczas prąd elektryczny płynący przez kondensator jest sumą trzech składowych. Analiza tych przebiegów i ich zmian w porównaniu ze stanem nowego wyrobu umożliwia ocenę stanu izolacji.

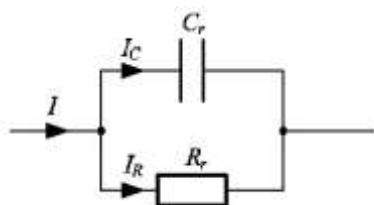
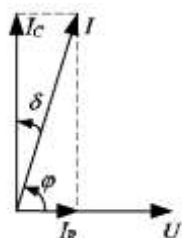


$$i(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_u$$

Rys. 1. Prądy płynące przez dielektryk po załączeniu napięcia stałego a następnie po zwarciu, i_c – prąd ładowania, i_a – prąd absorpcji, i_u – prąd upływu, i_r – prąd resorpcji

Składowa i_c jest krótkotrwałym prądem ładowania kondensatora, zależy od pojemności i od szeregowej rezystancji w obwodzie (stała ładowania RC). Prąd absorpcyjny jest związany z polaryzacją dielektryka, zanika znacznie wolniej, w czasie nawet kilku godzin. Prąd upływu jest związany z rezystywnością skośną, zależną od budowy materiału izolacyjnego. Przepływowi tego prądu towarzyszy ciągła zamiana energii elektrycznej na ciepło w materiale izolacyjnym.

Przy napięciu przemiennym sinusoidalnym rzeczywisty kondensator stratny można rozpatrywać jako kondensator idealny bezstratny z równoległym rezystorem reprezentującym wszystkie straty (rys. 2).

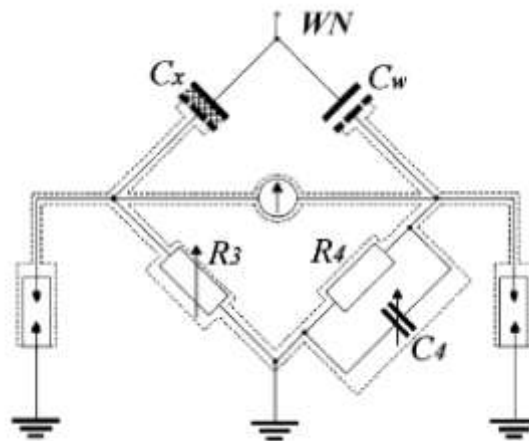


$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}$$

Rys. 2. Wykres wskazowy prądów kondensatora z dielektrykiem rzeczywistym i odpowiadający mu równoległy układ zastępczy RC

2. Prosty mostek Scheringa

Harald Schering, opracował w 1920 układ mostkowy do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ (rys. 3). Praktycznie całe wysokie napięcie przypada na gałęzie zawierające badany obiekt i kondensator wzorcowy (znajdujące się w polu probierczym). Część niskonapięciowa wraz ze wskaźnikiem równowagi i elementami ochrony przeciwporażeniowej (iskiernikami gazowanymi) jest zmontowana w jednej obudowie i umieszczona poza polem probierczym. Jako pojemności wzorcowe używa się często kondensatory z dielektrykiem gazowym o pomijalnej stratności. Zacisk uziemiający badanego obiektu musi być izolowany od ziemi (przyłączony do zacisku mostka). Dlatego prosty mostek Scheringa niestety nie nadaje się do pomiarów urządzeń trwale uziemionych (np. transformatory lub zakopane w ziemi kable). Pomiary takich obiektów są możliwe z odwróconymi mostkami Scheringa lub z mostkami Scheringa z uziemiona przekątną (odwróconymi o 90°).



Rys. 3. Schemat prostego mostka Scheringa, C_X – badany obiekt, C_W – kondensator wzorcowy, R_3 , C_4 – elementy regulacyjne mostka

W stanie równowagi, prąd w przekątnej mostka jest równy zeru a napięcia na gałęziach wysokonapięciowych i na niskonapięciowych są jednakowe.

$$Z_X \cdot Z_4 = Z_W \cdot Z_3 \quad (1)$$

$$R_3 \cdot C_X = R_4 \cdot C_W \quad (2)$$

$$R_X \cdot C_W = R_3 \cdot C_4 \quad (3)$$

Można z nich wyprowadzić wzory określające wielkości mierzone

$$C_X = C_W \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad \text{tg}\delta_X = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 \quad (4)$$

Przy danej częstotliwości napięcia i stałej wartości R_4 , tangens delta jest proporcjonalny do wartości C_4 uzyskanej podczas równoważenia mostka. Najczęściej rezystancja R_4 wynosi $100/\pi$, $1000/\pi$, lub $10000/\pi$ (Ω).

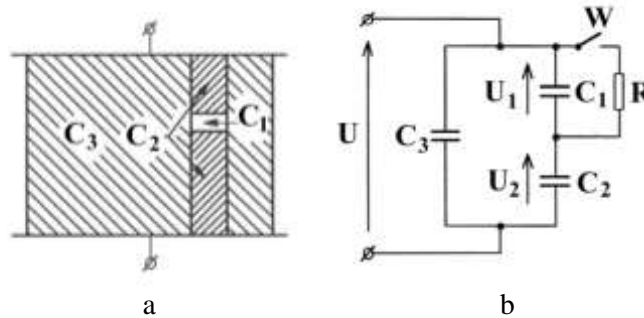
Znając wartości C_W , C_X i R_4 , można obliczyć z równania (2) wartość R_3 a następnie z (3) wartość C_4 do wstępnego zrównoważenia mostka.

3. Podstawy teoretyczne wyładowań niezupełnych (wnz)

Wyznaczając zależność $\text{tg}\delta = f(U)$ można za pomocą mostka Scheringa określić napięcie początkowe jonizacji – czyli napięcie początkowe wyładowań niezupełnych. Jednakże specjalne mierniki wnz mają znacznie większą czułość, nie wymagają równoważenia oraz mierzą intensywność wyładowań niezupełnych w postaci ładunku pozornego w pC.

Schemat przedstawiony na rys. 4b jest modelem elektrycznym dielektryka z pojedynczą wtrąciną gazową. Przy pewnej wartości napięcia U , napięcie na wtrącinie osiągnie wartość napięcia zapłonu U_{Z1} (zamknięcie wyłącznika W). Po zmniejszeniu się napięcia na wtrącinie do U_{G1} , wyładowanie gaśnie.

$$\Delta U_1 = U_{1Z} - U_{1G} \quad (5)$$



Rys. 4. Model układu izolacyjnego z wtrąciną gazową (a); jego schemat zastępczy (b), C_1 – pojemność wtrąciny, W – wyłącznik modelujący przebiec wtrąciny, R – rezystancja obwodu rozładowania po przebiciu wtrąciny

Czas trwania wyładowania jest bardzo krótki (rzędu kilku ns), można zatem uważać, że wartość napięcia z zasilającego transformatora w tak krótkim czasie jest stała. Dlatego rozptył ładunku po przebiciu wtrąciny przebiega w układzie pojemności C_1 , C_2 , C_3 . Ładunek neutralizowany podczas wyładowania, który nazwiemy ładunkiem rzeczywistym Q_1 wynosi

$$Q_1 \cong \Delta U_1 \cdot (C_1 + C_2) \quad (6)$$

Jednak zwarcie wtrąciny powoduje spadek napięcia ΔU na zaciskach układu.

$$\Delta U = \Delta U_1 \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_3} \quad (7)$$

Źródło napięcia wyrównuje ten spadek dosyłając do układu ładunek pozorny Q_P

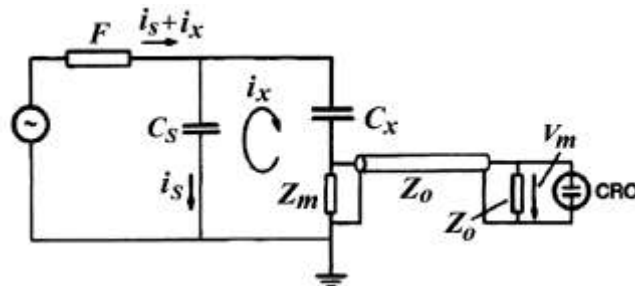
$$Q_P \cong \Delta U_1 \cdot C_2 \quad (8)$$

Ładunek pozorny Q_P jest znacznie mniejszy od ładunku rzeczywistego Q_1 , jest on jednak wielością mierzalną i dlatego stanowi podstawowy parametr intensywności wyładowań niezupełnych.

4. Pomiary elektryczne wyładowań niezupełnych

Pomiary elektryczne wyładowań niezupełnych są podstawową metodą detekcji i analizy wnz. Istnieją także inne metody, które umożliwiają wykrywanie wnz „z zewnątrz” bez konieczności włączenia elementów systemu pomiarowego do badanego obwodu. Zaliczamy do nich metodę akustyczną (wykrywanie fal akustycznych towarzyszącym wnz), metodę elektromagnetyczną (wykrywanie zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez wnz) oraz kamery wykrywające promieniowanie ultrafioletowe emitowane przez wyładowania koronowe (wnz).

Na rys. 5 przedstawiono podstawowy układ do pomiaru ładunku pozornego wnz. Zadaniem kondensatora sprzęgającego C_S jest zbocznikowanie transformatora dla impulsów wnz o wysokiej częstotliwości. Dzięki temu czułość pomiaru ulega zwiększeniu. Gdy pojemność badanego obiektu jest mniejsza od pojemności sprzęgającej, wówczas lepiej jest włączyć impedancję szeregowo z badanym obiektem. wtedy prąd o częstotliwości 50 Hz w tej gałęzi jest mniejszy niż płynący przez kondensator sprzęgający. Gdy $C_X > C_S$, wówczas lepiej jest włączyć impedancję Z_m szeregowo z kondensatorem sprzęgającym.



Rys. 5. Układ do pomiaru wnz z impedancją pomiarową Z_m włączoną szeregowo z badanym obiektem. F – dolnoprzepustowy filtr przeciwwzakłóceniewy, Z_0 – rezystor dopasowujący wejście oscyloskopu (miernika wnz) do impedancji falowej kabla

Niezależnie od charakteru impedancji pomiarowej, amplituda mierzonego na niej impulsu napięciowego wywołanego przez wnz jest proporcjonalna do ładunku pozornego. Gdy impedancja pomiarowa jest rezystancją, wówczas teoretycznie (przy pominięciu indukcyjności w obwodzie) spadek napięcia jest impulsem podobnym do impulsu przedstawionym na rys. 5 z rozdziału Podstawy teoretyczne do ćwiczenia V. W przypadku zastosowania indukcyjności jako impedancji pomiarowej – przebiegi mają charakter oscylacyjny tak jak na rys. 6b z rozdziału Podstawy teoretyczne do ćwiczenia V. Czułość metody jest większa dla obiektów o małej pojemności, zależy również od właściwie dobranej pojemności sprzęgającej.

Wyznaczenie zależności pomiędzy ładunkiem pozornym a wskazaniem mienika wnz przeprowadza się podczas tzw. kalibracji układu. Układ kalibrujący - generator impulsów prostokątnych U_0 połączony z kondensatorem C_0 stanowi źródło o znanym ładunku $Q_0 = U_0 \cdot C_0$. Przy wyłączonym napięciu probierczym, impulsy skalujące doprowadza się bezpośrednio do zacisków badanego obiektu włączonego w obwód pomiarowy wnz.

Literatura

- [1] Florkowska B., Wyladowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów. IPPT PAN, Warszawa 1997
- [2] Strykowski S., Paciorek Z., Ćwiczenia laboratoryjne wysokonapięciowe. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1999

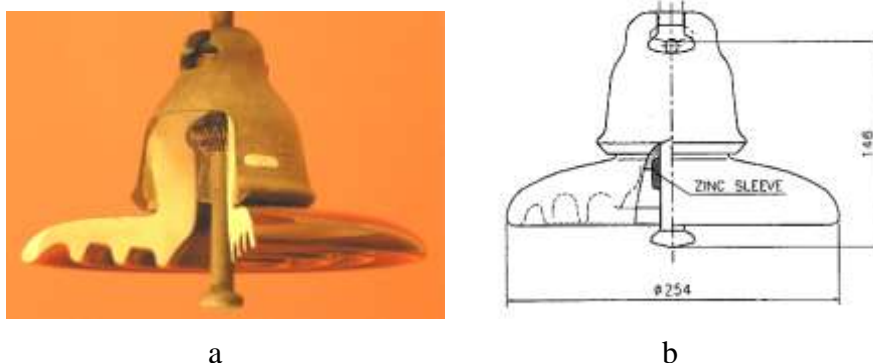
PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA VIII

ROZKŁAD NAPIĘCIA WZDŁUŻ IZOLATORÓW

1. Izolatory kołpakowe

Na liniach przesyłowych (wysokich napięć) już od roku 1907 stosowane są izolatory kołpakowe (rys. 1) połączone w łańcuchy. Identyczne izolatory są łączone ze sobą za pomocą metalowych sworzni i gniazd. Linie o wyższym napięciu posiadają łańcuchy z większą liczbą izolatorów kołpakowych. Ta możliwość łatwego dopasowywania długości łańcucha stanowi ważną zaletę izolatorów kołpakowych.

Każdy izolator kołpakowy składa się z porcelanowej lub szklanej części izolacyjnej oraz z metalowego kołpaka i trzonka umocowanych nad i pod dielektrykiem. Szkło jest specjalnie hartowane, dlatego po przebiciu elektrycznym lub uszkodzeniu mechanicznym rozpada się na mniejsze kawałki. Uszkodzenie izolatora jest więc dobrze widoczne. Jednak wytrzymałość mechaniczna uszkodzonego izolatora nie ulega zmianie i łańcuch nie zostaje zerwany. Standardowe izolatory kołpakowe mają średnicę klosza 254 mm i całkowitą wysokość 146 mm (rys 1b). Ich obciążenie mechaniczne może wynosić 80-120 kN (kilonewtonów). Dzięki specjalnemu „gruszkowatemu” ukształtowaniu izolatory te zmieniają siłę rozciągającą na siłę ściskającą materiał dielektryka. Rozwiązanie to zwiększa wytrzymałość mechaniczną izolatorów kołpakowych ponieważ odporność materiałów na ściskanie jest kilka razy większa niż na rozrywanie.



Rys. 1. Izolatory kołpakowe

a – produkcji Hescho (Hermsdorf-Schomburg)

b – standardowy izolator kołpakowy produkcji NGK Insulators z antykorozyjną wkładką cynkową

2. Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kołpakowych

Napięcie przeskoku całego łańcucha jest niestety mniejsze niż suma napięć przeskoków pojedynczych izolatorów. Jest to spowodowane nierównomiernym rozkładem napięcia wzdłuż łańcucha. Na izolatorze zawieszonym najniżej, przy przewodzie fazowym napięcie jest największe. Czasami w pobliżu dolnego izolatora zawieszają się pierścienie sterujące zmniejszające napięcie na tym izolatorze i istotnie wyrównujące rozkład napięcia wzdłuż łańcucha.

Najprostszy model elektryczny łańcucha izolatorów kołpakowych ma trzy typy pojemności: pojemność własną pojedynczego izolatora C_w , pojemność rozproszenia izolator - ziemia C_z i pojemność rozproszenia izolator – przewód fazowy C_p (rys. 2). Pojemność własna C_w każdego izolatora w łańcuchu jest praktycznie taka sama. Zakładając, że wszystkie pojemności C_p są

jednakowe i że wszystkie pojemności C_z mają również takie same wartości, wówczas rozkład napięcia wzdłuż łańcucha można opisać znaną zależnością:

$$U_i = \frac{U}{C_p + C_z} \left[C_p + C_z \frac{\text{sh}[k(N-1)]}{\text{sh}(kN)} - C_p \frac{\text{sh}(ki)}{\text{sh}(kN)} \right] \quad (1)$$

U_i – napięcie pomiędzy izolatorem o numerze „i” a przewodem fazowym,

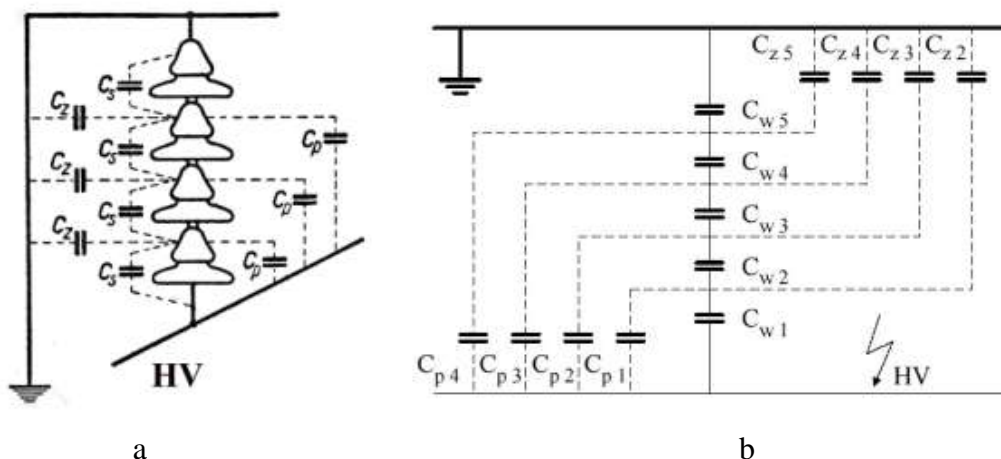
U – napięcie na całym łańcuchu, obliczone w sposób następujący : $U = U_1 \times \eta$

N – liczba izolatorów w łańcuchu, ΔU_{\max} – maksymalny spadek napięcia na jednym z izolatorów

sh – funkcja sinus hiperboliczny “sinh”, kN – współczynnik nierównomierności rozkładu napięcia

$$k = \sqrt{\frac{C_p + C_z}{C_w}} \quad (2)$$

$$k_N = \frac{\Delta U_{\max}}{U} \approx \frac{\Delta U_{\max}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta U(i)} \quad (3)$$



Rys. 2. Łańcuch złożony z 4 izolatorów kołpakowych

(a) rysunek łańcucha z naniesionymi pojemnościami

(b) model elektryczny

W rzeczywistości pojemności rozproszenia do przewodu fazowego C_p i do ziemi C_z zależą od położenia w łańcuchu. Dlatego napięcia obliczone ze wzoru (1) stanowią tylko pewne przybliżenie. Jeśli znane są wartości C_{zi} i C_{pi} to wówczas napięcie wzdłuż łańcucha można obliczyć np. za pomocą programu PSPICE. Wyznaczenie pojemności rozproszenia można dokonać za pomocą programów Metody Elementów Skończonych (MES) lub innych.

Przybliżone wartości pojemności rozproszenia dla wysokiego masztu linii wysokich napięć można obliczyć ze wzorów:

$$C_{pi} = 1,2 - 0,012 [i - (N - 1)] \quad (3)$$

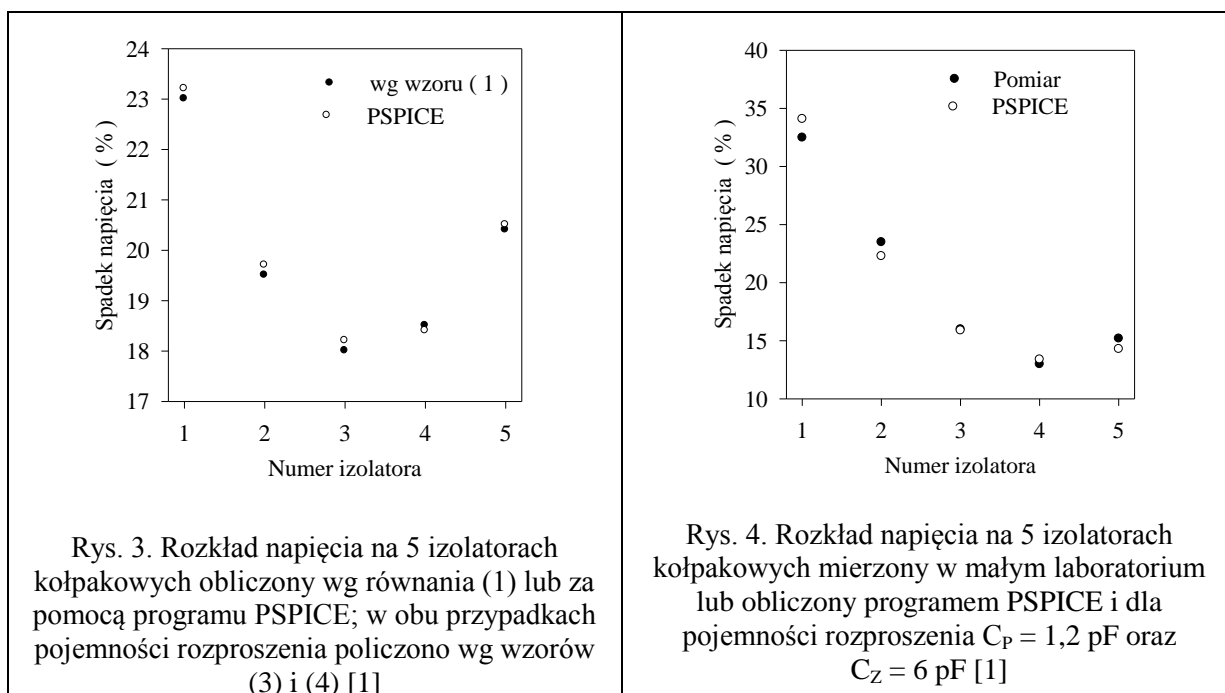
$$C_{zi} = 1,7 - 0,007 (1,0 - i) \quad (4)$$

gdzie i jest numerem izolatora liczonym od przewodu fazowego, wartości C_{pi} i C_{zi} są podane w pF.

Obliczenia za pomocą programu PSPICE dla łańcucha złożonego z 5 izolatorów i z pojemności rozproszenia obliczonych wg równań (4) i (5) dały praktycznie taki sam wynik jak dla obliczeń wg wzoru (1), który uwzględnia tylko jedną wartość dla wszystkich pojemności C_Z i jedną wartość dla wszystkich pojemności C_P (rys. 3). Do obliczeń wg wzoru (1) zastosowano wartość $C_P = 1,218$ pF oraz $C_Z = 1,71$ pF. Są to średnie z 4 wartości pojemności obliczonych ze wzorów (4) i (5).

Obliczony rozkład napięcia dla łańcucha złożonego z 5 izolatorów przedstawia rys. 3. Najmniejsze napięcie jest na izolatorze o numerze 3. Jednak pomiar w laboratorium pokazuje, że najmniejsze napięcie jest na izolatorze o numerze 4 (rys. 4). Ta niezgodność powodowana jest przez różne warunki w małym pomieszczeniu laboratorium o wymiarach $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ i wysokości $3,5\text{ m}$. Wzór (1) dotyczy natomiast masztu linii wysokiego napięcia (110 kV lub więcej) ze znacznie większymi wymiarami. Oczywiście w laboratorium pojemności do ziemi są większe niż w wypadku wysokiego masztu. Natomiast pojemności do przewodu fazowego mogą być porównywalne mimo tak krótkiego odcinka w laboratorium (1 m).

Aby sprawdzić powyższe spostrzeżenia przeprowadzono kilka symulacji programem PSPICE z taką samą wartością dla wszystkich pojemności rozproszenia do przewodu fazowego $C_P = 1,3$ pF a różnymi wartościami pojemności C_Z . Wyniki obliczeń dla $C_P = 1,3$ pF i $C_Z = 6$ pF (rys. 4) są zgodne z wynikami pomiaru w laboratorium. W obu przypadkach najmniejsza wartość napięcia przypada na izolator o numerze 4.



3. Błędy pomiarowe

Gdy do izolatora dołączony jest iskiernik kulowy (równoległe do pojemności własnej izolatora), wówczas napięcie na tym izolatorze a także na pozostałych izolatorach ulega niewielkiej zmianie. Pojemność iskiernika oraz pojemność przewodów doprowadzających zwiększają pojemności izolatora i dlatego zmniejszają napięcie na tym izolatorze.

Pojemności iskiernika i przewodów doprowadzających obliczono wg poniższych wzorów:

$$C_l \cong \frac{4\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{l}{r} + \ln \frac{l}{d} - 0,614} \quad (6)$$

$$C_k = 8 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot a \cdot \frac{1}{1 + \frac{a}{2 \cdot x}} \quad (7)$$

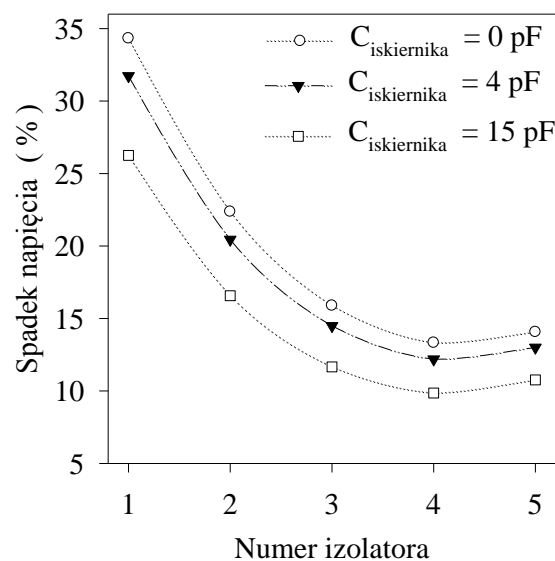
gdzie:

C_l – pojemność dwóch równoległych przewodów o długości l , promieniu r i znajdujących się w odległości $d \ll l$,

C_k – pojemność dwóch kul o tym samym promieniu a i odstępnie x spełniających warunek $a / 2 \cdot x < 0,5$.

Pojemność dwóch równoległych przewodów o długości 1 m i promieniu 0,5 mm wynosi 12 pF a pojemność między dwoma kulami o promieniu 10 mm i odstępnie 2 mm wynosi 0,9 pF. Gdy długość przewodów doprowadzających ma tylko 20 cm, wówczas ich pojemność wynosi zaledwie 3 pF.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń za pomocą programu PSPICE napięcia na łańcuchu 5 standardowych izolatorów kołpakowych o pojemności własnej równej 29 pF bez dołączonego iskiernika z przewodami doprowadzającymi o długości 1 m. Krzywa rozkładu napięcia dla przypadku bez iskiernika została oznaczona jako $C = 0$ a krzywa obliczona dla przypadku z iskiernikiem i przewodami doprowadzającymi - $C = 15$ pF. Suma napięć na łańcuchu bez iskiernika stanowi tylko 75% sumy napięć mierzonych iskiernikiem. Gdy napięcia są mierzone iskiernikiem z bardzo krótkimi 20 centymetrowymi przewodami doprowadzającymi, wówczas suma napięć wynosi 97,6% napięcia zasilającego cały łańcuch. Oznacza to, że błędy pomiarowe wynosiły odpowiednio **25% i 4%**.



Rys. 5. Rozkład napięcia na łańcuchu 5 izolatorów kołpakowych [1].

$C = 0$ – wartości rzeczywiste

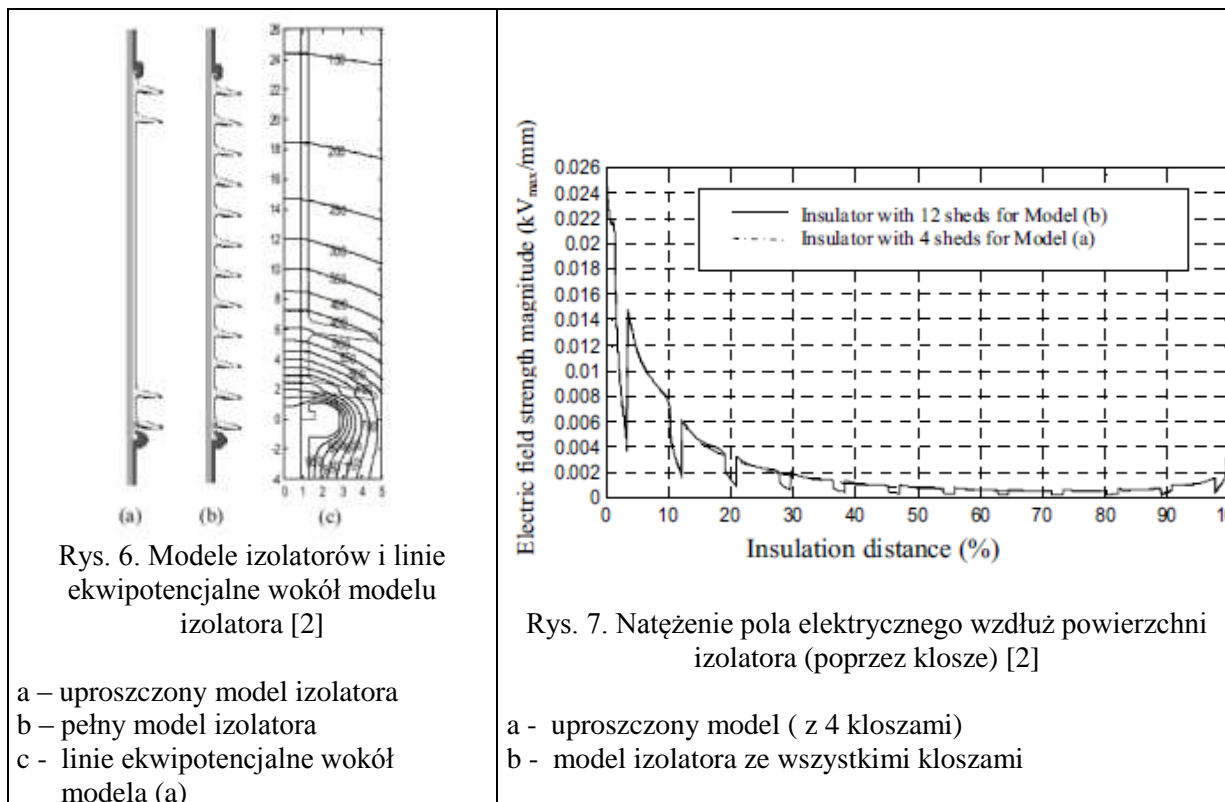
$C = 4$ pF (15 pF) – wartości obliczone z iskiernikiem i przewodami doprowadzającymi o długości 20 cm (100 cm)

4. Rozkład napięcia wzdłuż izolatorów długopniowych i ograniczników przepięć

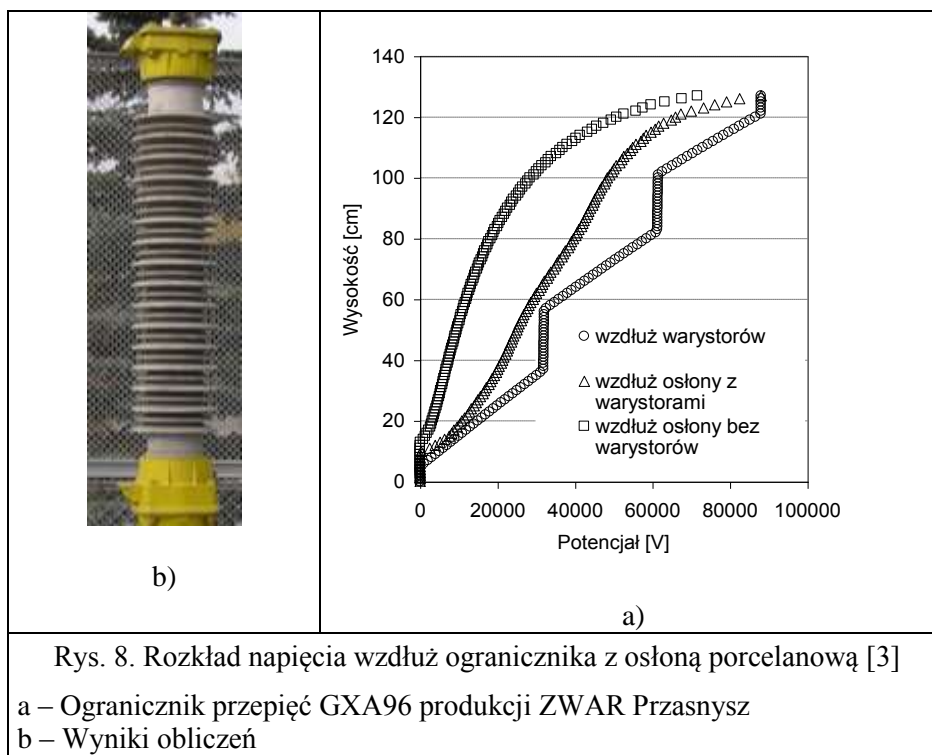
Na innych typach izolatorów rozkład napięcia jest również nierównomierny, np. na izolatorach długopniowych, wsporczych lub osłonach izolacyjnych. Nierównomierność rozkładu napięcia wzrasta z napięciem znamionowym co może doprowadzić do zapłonu wyładowań niezupełnych i związanych z nimi szumami, zakłóceniami radiowo-telewizyjnymi RTV i stratami energii. Długotrwałe

wyładowania niezupełne są bardzo niebezpieczne zwłaszcza dla izolatorów polimerowych i dlatego należy nie dopuszczać do ich zapłonu. Jednym ze środków poprawiających rozkład napięcia na izolatorach i tym samym zwiększającym napięcie początkowe jonizacji są pierścienie sterujące, stosowane na izolatorach kompozytowych już przy napięciu znamionowym 110 kV.

Wyniki obliczeń natężenia pola elektrycznego i rozkładu napięcia wzdłuż izolatora kompozytowego o napięciu znamionowym 34 kV otrzymane za pomocą programu COULOMB przedstawiają rys 6 i rys. 7. Obniżenia natężenia pola następują podczas przejścia linii obliczeń przez klosze o przenikalności dielektrycznej 4.3.



Rysunek 8 przedstawia rozkład napięcia wzdłuż porcelanowej osłony ogranicznika przepięć 110 kV oraz wzdłuż kolumny warystorów. Obliczenia wykonane zostały za pomocą programu metody elementów skończonych OPERA. Wykazano istotny wpływ kolumny warystorów na rozkład napięcia wzdłuż powierzchni osłony ogranicznika. Przy górnej elektrodzie największe natężenie pola wynosi 2 kV_{peak}/cm czyli 2,5 razy większe od wartości średniej.



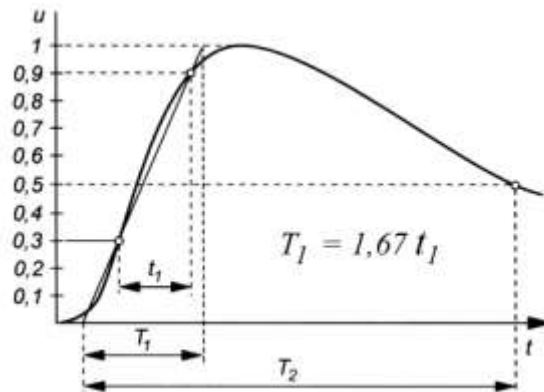
5. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Rebizant W., PSPICE application for modelling of cap and pin insulator string. Int. Conference on Modern Power Systems MEPS, Wrocław 2002, pp. 581-585.
- [2] Que W., Sebo S.A., Discussions of possible simplifications for the electric field and voltage distribution calculations along composite insulators. 13th Int. Symposium on High Voltage Engineering, Delft 2003, paper 230.
- [3] Chrzan K.L., Gielniak J., Voltage distribution along metal oxide surge arresters. 13th Int. Symposium on High Voltage Engineering, Delft 2003, paper 077.
- [4] Looms J.S.T., Insulators for high voltages. Peter Peregrinus Ltd, London 1990.
- [5] Chrzan K. L., Wiatrzyk M., Naito K., „Izolatory kołpakowe ze szklivem półprzewodzącym”. VI Konferencja Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana 2000, s. 81-87.
- [6] Mizuno Y., Naito K., Suzuki Y., Mori S., Nakashima Y., Akizuki M., „Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulators strings.” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Feb. 1999, pp. 100-104.

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA IX

WYTWARZANIE UDARÓW NAPIĘCIOWYCH

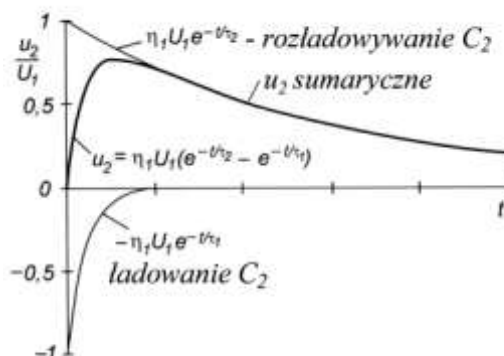
Erwin Marx opracował w 1923 roku układ do generacji napięć impulsowych. Udry piorunowe są stosowane do odtwarzania przepięć występujących w liniach elektroenergetycznych po uderzeniach piorunów. Są to impulsy aperiodyczne o kształcie pokazanym na rys. 1. Zdefiniowano na nim czas czoła T_1 i czas do półszczytu T_2 na grzbiecie udaru.



Rys. 1. Udar piorunowy i definicje czasu czoła T_1 oraz czasu do półszczytu T_2 .

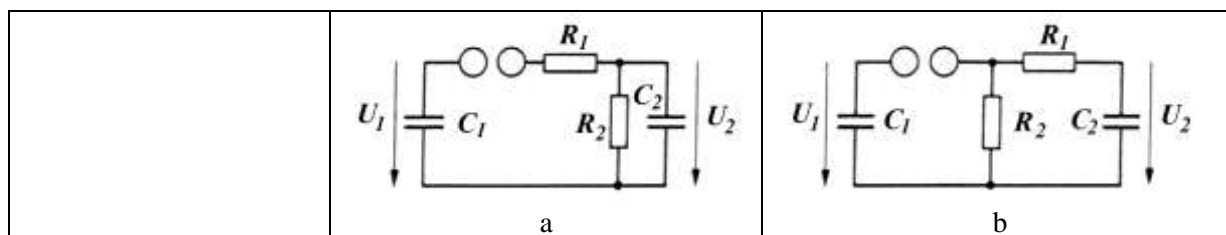
Najprostszym generatorem Marxa jest układ jednostopniowy, który stosowany jest do napięć rzędu 200 kV w dwóch odmianach (rys. 3). Kondensator C_1 ładuje się do napięcia U_1 . Po przebicciu iskiernika, kondensator C_2 jest ładowany poprzez rezystor R_1 (tłumiący). Czas czoła udaru jest proporcjonalny do stałej ładowania τ_1 . Równocześnie kondensator rozładowuje się poprzez rezystor R_2 (rezystor rozładowczy, układ typu A) lub poprzez rezystory R_1 i R_2 (typ B). Przebieg napięcia na wyjściu generatora opisany wzorem (1) osiąga wartość maksymalną po czasie około $2 \mu\text{s}$ a następnie wolniej opada zmniejszając się po $50 \mu\text{s}$ do wartości dwukrotnie mniejszej (rys. 2).

$$u_2 = \eta \cdot U_1 (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}) \quad (1)$$



Rys. 2. Przebieg napięcia na wyjściu generatora udarowego

Przybliżone wartości stałych czasowych i sprawności napięciowych dla generatorów jednostopniowych w wersji A i B podane są w tabeli 1.



Rys. 3. Podstawowe jednostopniowe generatory udarowe, a) typ A o mniejszej sprawności napięciowej, b) typ B o większej sprawności napięciowej

Tab. 1. Sprawność napięciowa i stałe czasowe jednostopniowych generatorów udarowych

	Układ typu A	Układ typu B
stała czasowa grzbietu	$\tau_2 \approx (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)$	$\tau_2 \approx R_2 \cdot (C_1 + C_2)$
stała czasowa czoła	$\tau_1 \approx \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$	$\tau_1 \approx R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$
sprawność napięciowa	$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}$	$\eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

Ponieważ dla generatorów udarów piorunowych normalnych 1,2/50 μ s spełnione są następujące warunki: $C_1 \gg C_2$ oraz $R_1 \ll R_2$, dlatego można w napisać, że:

$$\tau_1 \approx C_2 \cdot R_1 \quad (2)$$

$$\tau_2 \approx C_1 \cdot R_2 \quad (3)$$

Natomiast parametry czasowe udaru piorunowego T1 i T2 dla układu A

$$T_1 = 3,25 \cdot \tau_1 \approx 3,25 \cdot C_2 \cdot R_1 \quad (4)$$

$$T_2 = 0,73 \cdot \tau_2 \approx 0,73 \cdot C_1 \cdot R_2 \quad (5)$$

a dla układu typu B

$$T_1 \approx 2,5 \cdot R_1 \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

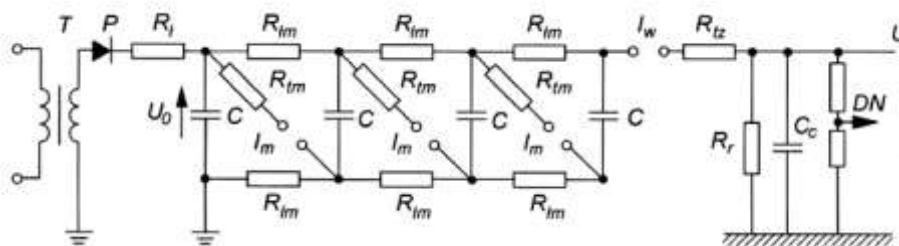
$$T_2 \approx R_2 \cdot (C_2 + C_1) \cdot \ln 2 \quad (7)$$

Kształt wzoru (6) wynika z faktu, że ładowanie kondensatora C2 odbywa się w obwodzie połączonych szeregowo pojemności C1, C2 i rezystora R1. Z pewnym uproszczeniem można przyjąć, że czas czoła T1 zależy głównie od rezystora tłumiącego R1 i pojemności C1 a czas do półszczytu T2 zależy przede wszystkim od rezystora rozładowczego R2 i pojemności C1. Dla uniknięcia drgań wielkiej częstotliwości rezystancja tłumiąca musi być odpowiednio duża:

$$R_2 > 2 \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (C_1 \cdot C_2)}{C_1 \cdot C_2}} \quad (8)$$

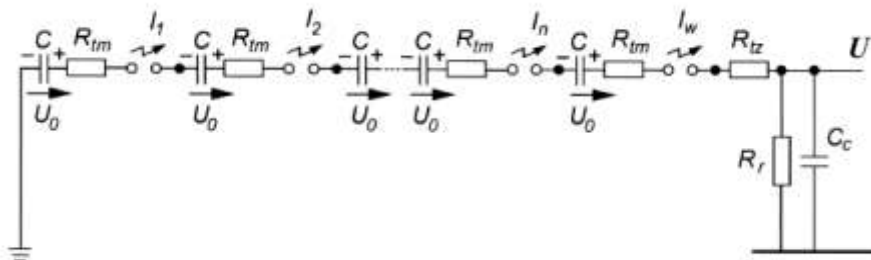
Oczywiście pojemność C_1 musi być znacznie większa od C_2 gdyż C_1 jest źródłem energii przy ładowaniu C_2 . Jeżeli C_1 będzie zbyt małe, to napięcie na obiekcie badanym będzie znacznie mniejsze od napięcia ładowania C_1 (mała sprawność napięciowa). Pojemność C_1 powinna być 10 –20 razy większa od C_2 . Jeśli generator ma być stosowany do prób z układami różnych typów to zaleca się stosować dodatkową pojemność C_d , włączając ją równolegle do badanego obiektu. Ma to na celu uniknięcie konieczności za każdym razem dobierania rezystorów R_1 i R_2 ze względu na zmieniającą się pojemność obiektu. Przy badaniach związanych z przeskokami w powietrzu odpowiednią wartością dla C_d jest wartość 200 pF.

Dla napięć wyższych od 200 kV stosowane są generatory wielostopniowe. Generator czterostopniowy przedstawiony jest na rys. 4.



Rys. 4. Schemat 4-stopniowego generatora udarowego, R_1 – rezystor ograniczający prąd ładowania, R_{tm} –międzystopniowe rezystory ograniczające prąd ładowania, R_{tz} – rezystor tłumiący zewnętrzny, R_r = rezystor rozładowczy, C – kondensatory główne, C_c – kondensator obciążający generator

Kondensatory poszczególnych stopni są ładowane jednocześnie w połączeniu równoległym ze źródła napięcia stałego o maksymalnym napięciu rzędu 200 kV. Po zapłonie iskierników kondensatory są przełączane w połączenie szeregowe a napięcie na wyjściu generatora jest sumą napięć kondensatorów na poszczególnych stopniach. Rozładowanie kondensatorów następuje przez przebite odstępki międzyelektrodowe iskierników kulowych, przez międzystopniowe rezystory R_{tm} , rezystor tłumiący zewnętrzny i kondensator obciążający (rys. 4, rys. 5).



Rys. 5. Obwód rozładowywania generatora 4 stopniowego [2]

Generator udarowy mający n stopni można przedstawić w postaci równoważnego generatora jednostopniowego (rys. 3) o pojemności $C_1 = C / n$. Na pojemności C_1 napięcie $U_1 = n \cdot U_0$.

Rezystor $R_1 = \sum R_{tm} + R_{tz}$.

Rezystor R_2 odpowiada rezystorowi rozładowczemu R_r .

Pojemność C_2 jest sumą pojemności kondensatora obciążającego C_c , pojemności badanego obiektu oraz pojemności urządzeń pomiarowych (np. iskiernika pomiarowego lub dzielnika napięcia).

Po tych przekształceniach można oszacować czasy T_1 i T_2 korzystając ze wzorów (4) i (5).

Dla generatorów udarów wielostopniowych o dużych wymiarach, rachunkowe określenie kształtu udaru na podstawie parametrów RC obwodu, możliwe jest tylko z dużym przybliżeniem. Istotne stają się indukcyjności, które zostały pominięte. W tym wypadku kształt udaru należy określić przy pomocy dzielnika napięcia i oscyloskopu.

Literatura

- [1] Marx E., Laboratorium wysokich napięć. PWT Warszawa 1951
- [2] Beyer M., Boeck W., Moeller K., Zaengl W., Hochspannungstechnik theoretische und praktische Grundlagen. Springer, Berlin 1986
- [3] Flisowski Z. (red) Laboratorium techniki wysokich napięć. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006
- [4] Abdel-Salam M., Anis H., El-Morshedy A., Radwan R., High voltage engineering, theory and practice. Marcel Dekker, New York 2000
- [5] Hylten-Cavallius N., High voltage laboratory planning. Haefely, Basel 1986

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA X

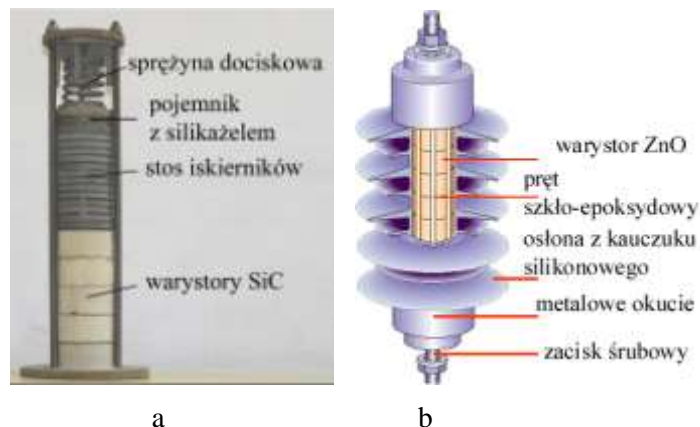
DIAGNOSTYKA OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Ograniczniki przepięć są aparatami służącymi do tłumienia (obniżania) przepięć. Pierwszymi urządzeniami redukującymi przepięcia w systemie elektroenergetycznym były iskierniki. Te proste elementy mają jednak zasadniczą wadę, ich zadziałanie – przebicie przerwy międzyelektrodowej – powoduje zwarcie. Dlatego już w latach trzydziestych ubiegłego stulecia powstały odgromniki wydmuchowe a nieco później - odgromniki zaworowe (ograniczniki iskiernikowe). Dopiero po 50 latach, gdy odkryto efekt warystorowy w ceramice na bazie tlenku cynku ZnO, zbudowane zostały pierwsze ograniczniki bez iskierników, przeznaczone dla rozdzielni wysokich napięć.

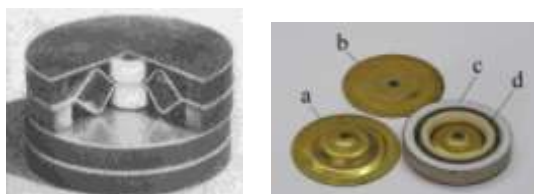
1. Budowa ograniczników

Ograniczniki iskiernikowe zbudowane są ze stosu iskierników oraz kolumny warystorów karborundowych (rys. 1a) umieszczonych w szczelnej porcelanowej osłonie. Miedziane elektrody iskiernika są specjalnie wyprofilowane a najmniejsza ich odległość jest rzędu 1 mm (rys. 2). Dzięki tak krótkiej przerwie iskrowej, chłodzenie łuku jest bardzo efektywne. Szereg krótkich iskier jest łatwiej zgasić niż jeden dłuższy łuk. Warystory włączone szeregowo w obwód palących się iskier ograniczają ich prąd. Dzięki temu, ogranicznik po przejściu fali przepięciowej jest zdolny zgasić łuk palący się pod napięciem roboczym. Zapłon iskierników i ich zgaszenie zachodzi w jednym półokresie napięcia i nie powoduje zadziałania wyłączników oraz przerywania zasilania.

W stanie normalnej pracy, rozkład napięcia wzdłuż kolumny iskierników jest nieliniowy. Dla jego wyrównania stosuje się rezystory sterujące, połączone równoległe z każdym iskiernikiem. Są one wykonane w postaci pierścienia umieszczonego między elektrodami iskiernika (rys. 2b).

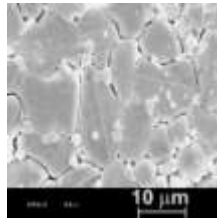


Rys. 1. Budowa ograniczników przepięć, a) wnętrze ogranicznika iskiernikowego, b) ogranicznik beziskiernikowy



Rys. 2. Iskiernik ograniczników wysokich napięć, a) elektroda profilowana, b) elektroda płaska, c) rezystor sterujący rozkładem napięcia, d) pierścień izolacyjny

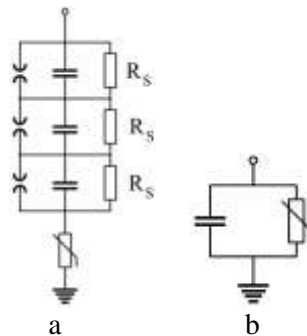
Charakterystyka warystorów ZnO jest bardzo nieliniowa (współczynnik nieliniowości wynosi 30-50). Przy napięciu roboczym prąd płynący przez warystory wynosi około 0,5 – 2 mA a przy przepięciu o amplitudzie dwukrotnie większej wzrasta aż milion razy ! Dlatego możliwe stało się zbudowanie ogranicznika bez iskierników. Konstrukcja ograniczników beziskiernikowych jest więc bardzo prosta, w środku obudowy znajduje się tylko kolumna warystorów (rys. 1b). Warystory tlenkowe są zbudowane z ceramiki zawierającej kilkanaście różnych tlenków metali, w tym około 90% ZnO. Półprzewodzące ziarna kryształów ZnO mają wymiar około 10 μm . Efekt warystorowy uzyskiwany jest na styku ziaren lub na cienkiej warstwie pomiędzy ziarnami o dużej zawartości tlenku bizmutu Bi_2O_3 (rys. 3).



Rys. 3. Struktura ceramiki warystorów ZnO

2. Modele

Schemat zastępczy ogranicznika iskiernikowego przedstawia rys. 4a. Pojemność elektrod iskierników reprezentują kondensatory, rezystory sterujące R_S również dołączone są równolegle do iskierników. Szeregowo ze stosem połączony jest rezystor nieliniowy modelujący stos warystorów SiC. Najprostszy model ogranicznika beziskiernikowego można przedstawić jako równoległe połączenie kondensatora oraz nieliniowego rezystora. Przenikalność elektryczna ceramiki warystorów ZnO jest olbrzymia ($\epsilon_r \approx 500$), dlatego pojemność tych warystorów jest duża. Przedstawione modele stosowane są dla celów diagnostycznych czyli kontroli stanu ograniczników przy napięciu roboczym. Do badania ograniczników przy pod wpływem uderów prądowych opracowano inne modele z indukcyjnościami.

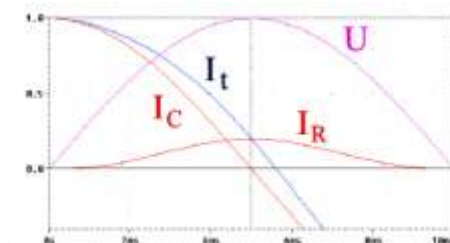


Rys. 4. Schematy zastępcze ograniczników przepięć, a) ogranicznik iskiernikowy, b) ogranicznik beziskiernikowy

3. Diagnostyka

Badanie ogranicznika iskiernikowego polega na pomiarze napięcia zapłonu oraz prądu płynącego przez rezystory sterujące przy napięciu roboczym. Natomiast stan ograniczników beziskiernikowych zależy od prądu płynącego przez stos warystorów. Pomiar prądu sterującego ograniczników beziskiernikowych oraz prądu płynącego przez warystory ZnO można wykonywać przy napięciu stałym. Niestety wymaga to wyłączenia napięcia roboczego i dysponowaniem odpowiednim źródłem napięcia stałego. Przy napięciu przemiennym składowa pojemnościowa prądu I_C jest ponad 10 razy większa od składowej rezystancyjnej I_R (rys. 5). Jednakże to właśnie składowa rezystancyjna jest markerem stanu ogranicznika ponieważ jej wartość wzrasta przy zawilgoceniu wnętrza lub pod wpływem degradacji warystorów.

Amplitudę składowej rezystancyjnej można wyznaczyć przez pomiar wartości chwilowej prądu całkowitego I_t gdy napięcie osiąga wartość maksymalną (rys. 5). Metoda ta wymaga pomiaru wysokiego napięcia (dysponowania dzielnikiem napięcia). Na dokładność metody duży wpływ mają harmoniczne odkształcające przebieg napięcia. Dlatego opracowane zostały metody analizy prądu nie wymagające sygnału napięciowego.



Rys. 5. Przebiegi składowych pojemnościowej I_C , rezystancyjnej I_R , prądu całkowitego I_t oraz napięcia U .

Literatura

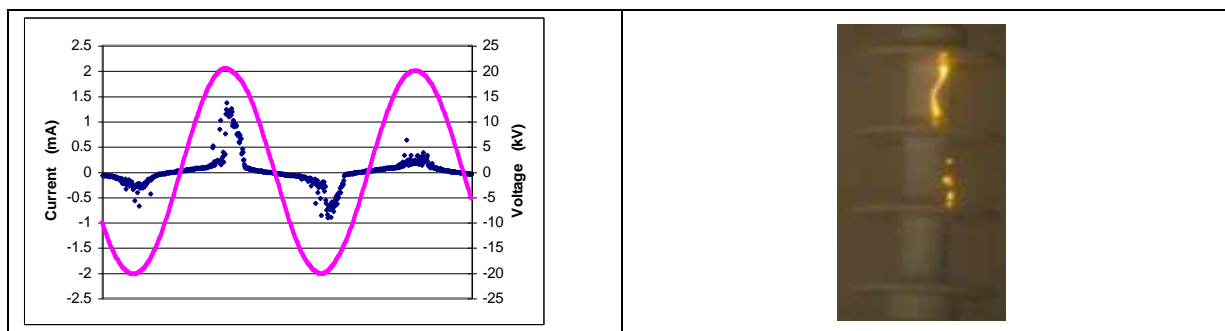
- [1] Chrzan K.L., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003

PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA XI

PRĄD UPŁYWU NA ZABRUDZONYM IZOLATORZE

1. Wstęp

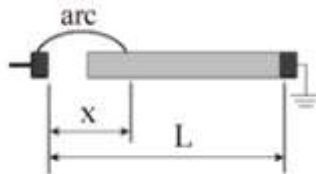
Na czystych i suchych izolatorach prąd upływu jest bardzo mały, rzędu mikroamperów i zależy od pojemności pomiędzy jego okuciami. Po przyłożeniu napięcia do intensywnie zabrudzonego i zawilgoconego izolatora, prąd upływu ma charakter rezystancyjny i może osiągnąć wartość rzędu 1 A. Początkowo, gdy na izolatorze warstwa zabrudzeniowa jest ciągła, prąd tak jak i napięcie ma kształt sinusoidalny. Jednak w miejscach gdzie gęstość prądu jest większa, wysychanie następuje szybciej i tworzą się tam strefy suche o dużej rezystancji powierzchniowej. Gradient napięcia na obszarze strefy suchej jest wielokrotnie większy niż wzdłuż wilgotnej części izolatora. Przeskoki stref suchych powodują nagły wzrost prądu upływu co powoduje, że jego kształt ulega zniekształceniu (rys. 1). Jeśli luki są w stanie wydłużyć się do około 66% całkowitej długości drogi upływu to dochodzi do przeskoku na całym izolatorze a prąd osiąga wartość prądu zwarcia układu zasilającego.



Rys. 1. Słaby łuk o amplitudzie prądu 1.4 mA na izolatorze o niewielkim zabrudzeniu

2. Model Obenausa

Zgodnie z modelem opracowanym przez Fritz'a Obenaus, na zabrudzonym izolatorze w postaci wąskiej płaszczyzny pali się pojedynczy łuk (rys. 2). Równania (1) i (2) są ważne tylko dla uproszczonego modelu izolatora nie mającego kloszy (rys. 2). Napięcie zasilające można zatem przedstawić jako sumę napięcia na łuku i napięcia wzdłuż wilgotnej części izolatora.



Rys. 2. Model Obenausa przeskoku na równomiernie zabrudzonej wąskiej płaszczyźnie izolacyjnej

$$U = A \cdot x \cdot I^{-n} + I \cdot r_p (L - x) \quad (1)$$

gdzie:

x – długość łuku w cm

L – długość drogi upływu izolatora w cm,

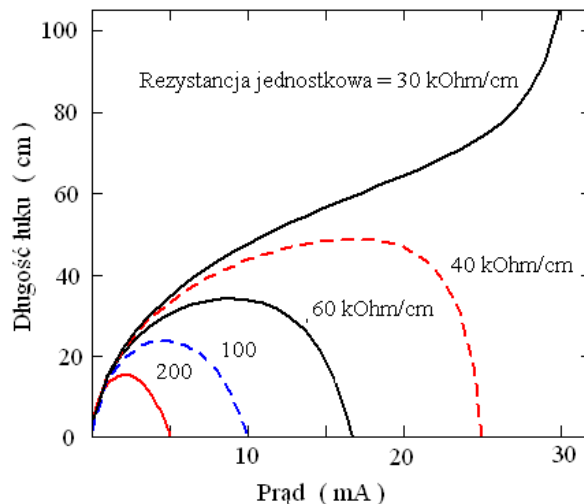
r_p – rezystancja jednostkowa warstwy zabrudzeniowej w $k\Omega/cm$,

A, n – stałe łuku

Długość łuku jako funkcję prądu można obliczyć z równania (2):

$$x = \frac{U - r_p \cdot L \cdot I}{A \cdot I^{-n} - r_p \cdot I} \quad (2)$$

Z równania (2) obliczono długość łuku jako funkcję prądu dla izolatora o kształcie walca o długości 105 cm i średnicy 3 cm, przy napięciu probierczym 75 kV i różnym stopniu zabrudzenia (rezystancji jednostkowej warstwy zabrudzeniowej). Z danych literaturowych przyjęto do obliczeń wartości stałych łuku $A = 140$ i $n = 0,56$. Wyniki obliczeń wykonanych za pomocą programu Mathcad®6 pokazano na rys. 3. Krytyczna wartość rezystancji jednostkowej, która może spowodować przeskok wynosi około 35 kΩ/cm.



Rys. 3. Długość łuku w zależności od prądu i rezystancji jednostkowej warstwy zabrudzeniowej obliczona z równania (2) za pomocą programu Mathcad®6 dla napięcia zasilającego $U = 75$ kV (105 kV_{max}) i drogi upływu $L = 105$ cm [1]

Krytyczne napięcie U_C (minimalne napięcie przeskoku) i krytyczny prąd I_C można oszacować z równań (3) (4):

$$U_C = L \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (3)$$

$$I_C = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (4)$$

Krytyczne napięcie związane jest z krytycznym prądem następującą zależnością:

$$U_C = A \cdot L \cdot I_C^{-n} \quad (5)$$

Prądy upływu na izolatorach są oczywiście mniejsze od prądu krytycznego. Bardzo przydatną jest możliwość oszacowania wartości napięcia przeskoku odpowiadającego najwyższej wartości prądu I_h mierzonego podczas prób zabrudzeniowych w laboratorium lub w warunkach naturalnych przy niższym napięciu U . Oczywiście chodzi tu o próby, w których nie doszło do przeskoku. Problem ten został rozwiązany przez Zhanga [1]:

$$U_C = L \cdot \left(\frac{U}{2L} \right)^{\frac{n}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot I_h^{\frac{-n}{n+1}} \quad (6)$$

Inżynierowie odpowiedzialni za eksploatację linii i stacji elektroenergetycznych muszą określić amplitudę prądu upływu uznaną za dopuszczalną. Często przyjmuje się ją na poziomie 100 lub 250 mA. Gdy prąd przekroczy wartość uznaną za dopuszczalną podejmuje się środki zapobiegające przeskokowi zabrudzeniowemu. Najczęściej, okresowo czyści się izolatory lub nakłada się hydrofobowe powłoki z kauczuku silikonowego.

3. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Prąd upływu na naturalnie zabrudzonych izolatorach porcelanowych i silikonowych. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 2008, s. 117-120

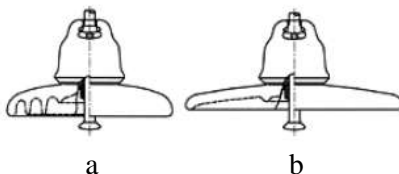
PODSTAWY TEORETYCZNE DO ĆWICZENIA XII
ZJAWISKO ODWRÓCENIA BIEGUNOWOŚCI W SŁABO
NIERÓWNOMIERNYM POLU ELEKTRYCZNYM

1. Wstęp

Napięcie przeskoku przy uderzeniach łączeniowych o biegunowości dodatniej łańcuchów izolatorów kołpakowych jest mniejsze niż przy uderzeniach ujemnych. W pewnych próbach laboratoryjnych przeprowadzanych przed 40 laty otrzymywano niekiedy wyniki przeciwne. W próbach pod sztucznym deszczem napięcie przeskoku przy uderzeniach piorunowych ujemnych łańcucha złożonego z dwóch izolatorów długopniowych było nieco mniejsze niż przy uderzeniach dodatnich. Zjawisko to nazwane odwróceniem biegunowości wykazano także na łańcuchu izolatorów kołpakowych, liniowych izolatorach długopniowych oraz na izolatorach wsporczych pod sztucznym deszczem.

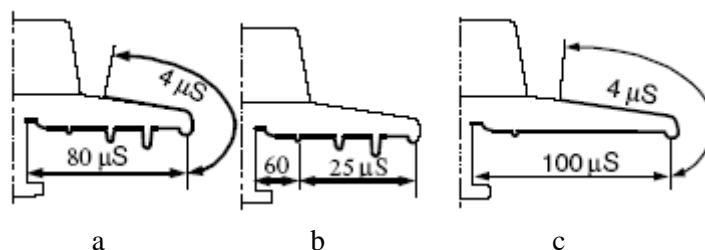
2. Napięcie przeskoku izolatorów kołpakowych

Próby wytrzymałości łańcuchów 5 izolatorów kołpakowych standardowych i aerodynamicznych (rys. 1) wykonano wg metody góra-dół. Zastosowano udary piorunowe normalne 1,2 /50 μ s o biegunowości dodatniej i ujemnej.



Rys. 1. Standardowy izolator kołpakowy (a) i izolator kołpakowy aerodynamiczny (b) [1]

Na izolatory nanoszono warstwę składającą się z dwóch stref o różnych wartościach konduktywności powierzchniowej (rys. 2, wartości mierzone bezpośrednio po zabrudzeniu). Pozostawiano również strefę „czystą” modelującą strefę suchą przy kołpaku o szerokości 2,5 cm (rys. 2a), 3 cm (rys. 2c) lub całą górną powierzchnię klosza (rys. 2b). Takie nierównomierne zabrudzenie izolatora modeluje warunki, w których izolatory zostały częściowo wyczyszczone przez deszcz. Na tak zanieczyszczonym izolatorze wyładowania mogą zapalać się w pobliżu kołpaka na części górnej izolatora. Badania wykonywane w warunkach naturalnych w RPA wykazały, że tego typu nierównomierne zabrudzenie może być powodem tzw. „niewyjaśnionych przeskoków”.

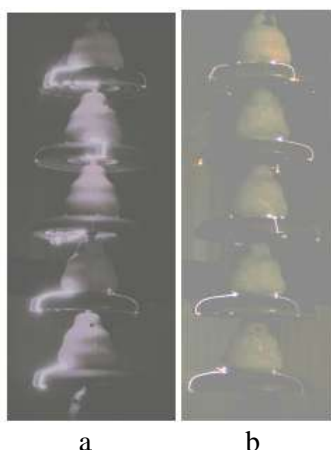


Rys. 2. Konduktywność powierzchniowa na nierównomiernie zabrudzonych izolatorach

Pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku łańcuchów z 5 standardowymi izolatorami było równe około 500 kV. Gdy izolatory były zabrudzone równomiernie o konduktywności w zakresie 7 – 15 μ s, napięcie przeskoku zmniejszyło się do 410 kV. W obu tych przypadkach napięcie przeskoku o biegunowości ujemnej było tylko nieznacznie większe od napięcia przeskoku o biegunowości dodatniej. Jednakże przy opisanym wcześniej zabrudzeniu nierównomiernym wytrzymałość zmniejszyła się aż dwukrotnie w porównaniu z czystymi izolatorami. Ponadto **przy biegunowości**

ujemnej, napięcie przeskoku było o 10% mniejsze niż przy udarach dodatnich. Napięcie przeskoku izolatorów standardowych zabrudzonych równomiernie zmniejszyło się tylko o 80 kV a izolatorów z nierównomiernym zabrudzeniem aż o 200 kV w porównaniu do izolatorów czystych. Ten wynik potwierdził znany wpływ stref suchych na wytrzymałość izolatorów przy napięciach udarowych.

Na rys. 3 pokazano wyładowania palące się równolegle w różnych miejscach na kloszach. Na izolatorach standardowych łatwo jest rozróżnić gołym okiem czy wystąpił przeskok, czy nie było przeskoku. Wyładowania, które nie są w stanie doprowadzić do przeskoku emitują znacznie mniej światła, mają mniejszą średnicę i są krótsze.



Rys. 3. Wyładowania na zabrudzonych izolatorach
a – przypadek przeskoku
b – przypadek bez przeskoku

3. Wpływ biegunowości udarów na modelach izolatorów kołpakowych

Niższe ujemne napięcie przeskoku nierównomiernie zabrudzonych izolatorów można wytłumaczyć wpływem zjawiska odwrócenia biegunowości występującym w układach o słabo nierównomiernym polu elektrycznym. Ujemne napięcie przebicia iskiernika kulowego w polu równomiernym (gdy stosunek odstępów S do średnicy kul D jest mniejszy od 0,5) jest takie samo jak napięcie przebicia o biegunowości dodatniej. W polu nierównomiernym gdy, gdy $S/D > 1,4$, ujemne udarowe napięcie przebicia jest większe od napięcia o biegunowości dodatniej. W obszarze pośrednim $0,5 < S/D < 1,4$, wytrzymałość elektryczna przy udarach ujemnych jest niższa.

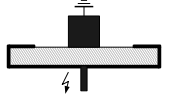
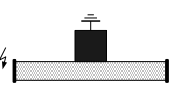
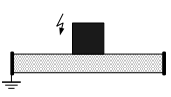
Przeprowadzono dodatkowe pomiary napięcia przeskoku na płaskich, okrągłych modelach izolatorów kołpakowych o średnicy 25 cm. Górna elektroda modelująca kołpak miała średnicę 4,5 cm. Druga elektroda była okrągłą płytą o średnicy 25 cm i / lub taśmą metalową owiniętą wzdłuż krawędzi dielektryka (tab. 1). Gdy elektroda wysokonapięciowa ma średnicę większą niż elektroda uziemiona, to wówczas napięcie przeskoku o biegunowości ujemnej jest mniejsze niż napięcie przeskoku o biegunowości dodatniej (tab. 1). **Największy stosunek $U_+ / U_- = 1,29$ stwierdzono na modelu o grubości dielektrycznej płyty równej 3 cm**, z dodatkowym grafitowym pierścieniem o szerokości 4 cm, położonym na górnej powierzchni modelu. Gdy elektroda wysokonapięciowa ma średnicę mniejszą niż elektroda uziemiona, wówczas napięcie przebicia o biegunowości dodatniej jest mniejsze od napięcia przeskoku przy udarach ujemnych.

Gdy utworzy się strefa sucha w dolnej części izolatora kołpakowego przy trzonku, wówczas skutek małej średnicy trzonka, pole elektryczne w obszarze strefy suchej jest bardzo nierównomierne. Dlatego napięcie przeskoku o biegunowości ujemnej takiej strefy suchej jest większe niż napięcie przeskoku o biegunowości dodatniej (zjawisko odwrócenia biegunowości nie występuje). Wyżej

opisane fakty tłumaczą, że przyczyną zjawiska odwrócenia biegunowości na łańcuchach izolatorów są procesy zachodzące na pojedynczych izolatorach kołpakowych.

Zjawisko odwrócenia biegunowości może wystąpić gdy strefa sucha powstanie przy kołpaku pod wpływem napięcia roboczego 50 Hz. Taki proces jest możliwy wówczas gdy górna część klosza jest słabo zabrudzona a część dolna jest intensywnie zabrudzona. Dodatkowo, nawilgacanie warstwy zabrudzeniowej musi być małe, np. gdy wilgotność powietrza jest bardzo wysoka, występuje mgła albo drobna mżawka.

Tab. 1. Stosunek dodatniego napięcia przeskoku do ujemnego napięcia przeskoku dla różnych modeli izolatorów kołpakowych

Układ	Grubość płyty (cm)	$\frac{U_+}{U_-}$
	3	1,29
	1,2	1,15
	1,2	0,82

4. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Wytrzymałość izolatorów kołpakowych przy uderzeniach piorunowych. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 8, 2008, s. 40-43
- [2] Chrzan K.L., Schwartz H., Häusler H., Effect of impulse polarity on the flashover voltage of polluted cap and pin insulators. 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cap Town 2010, paper E-30.
- [3] Chrzan K.L., Wytrzymałość łańcuchów izolatorów kołpakowych przy uderzeniach łączeniowych. Przegląd Elektrotechniczny nr 5, 2006, s. 81-84

ĆWICZENIE I

UKŁAD PROBIERCZY I POMIARY WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

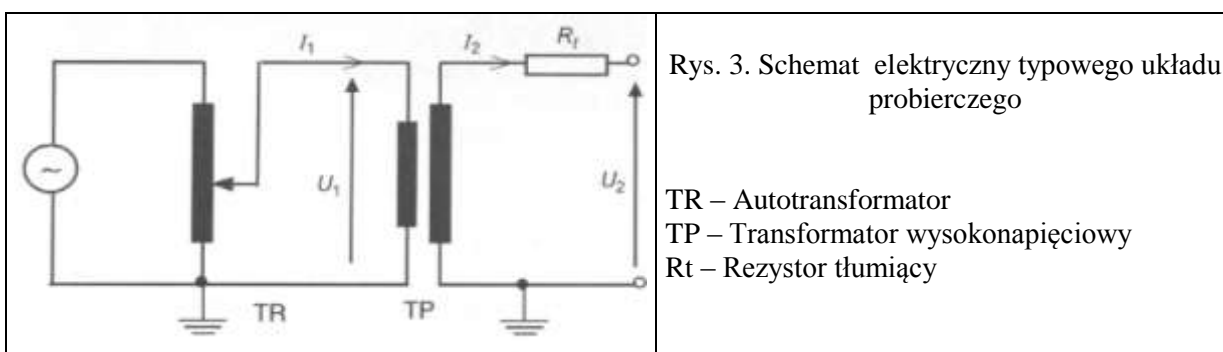
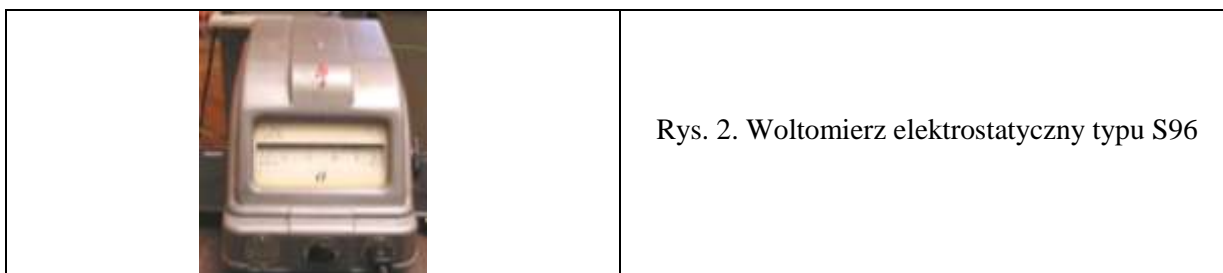
1.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wykonanie pomiarów wysokiego napięcia przemiennego za pomocą iskiernika kulowego, woltomierza elektrostatycznego, pojemnościowego dzielnika napięciowego i przekładnika napięciowego.

1.2. Pomiar za pomocą iskiernika kulowego i woltomierza elektrostatycznego

1.2.1. Stanowisko pomiarowe

Pomiary wykonuje się w układzie probierczym przedstawionym na rys. 1. Woltomierz elektrostatyczny typu S96 pokazany jest na rys. 2.



1. 2. 2. Spis przyrządów

- Transformator wysokiego napięcia firmy Koch & Sterzel Dresden w układzie symetrycznym (z 2 izolatorami przepustowymi), przekładnia napięciowa 90 V/110 V/130 V / 120 kV,
- $I_1 = 25$ A (na stronie niskiego napięcia), $I_2 = 50$ mA (na stronie wysokiego napięcia),
- $S = 6$ kVA
- Specjalna konstrukcja izolatorów przepustowych z dużą średnicą uziemionej elektrody zapewnia wysokie napięcie początkowe wyładowań ślizgowych.
- Zaciski 1 – 2: $U_1 = 90$ V, zaciski 1 – 3: $U_1 = 110$ V, zaciski 1 – 4: $U_1 = 130$ V
- W tym ćwiczeniu transformator stosuje się w układzie niesymetrycznym (jeden koniec uzwojenia wysokiego napięcia został uziemiony (uziemiony sworzeń izolatora przepustowego)).

Uwaga ! W układzie niesymetrycznym najwyższe dopuszczalne napięcie wynosi 90 kV.

- Iskiernik kulowy firmy Siemens & Halske o średnicach kul 10 cm, jedna kula uziemiona.
- Woltomierz elektrostatyczny typ S96, 7,5/15/30 kV, 20 Hz – 10 MHz
- Autotransformator 220 V/ 0 – 250 V, 10 A
- Rezystor ograniczający prąd zwarciový (opornica suwakowa) 8,2 Ω , 2,9 A
- Rezystor tłumiący przepięcia 33 k Ω
- Woltomierze elektromagnetyczne z różnym zakresemi pomiarowymi
- Dodatkowe elementy układu probierczego: wyłączniki, bezpieczniki, lampki sygnalizacyjne, układ blokady, przenośny uziemiacz.

1. 2. 3. Zadania pomiarowe

1. Narysuj schemat układu probierczego jak na rys. 3 zawierającego jednak wszystkie niezbędne elementy
2. Zmierz wysokie napięcie za pomocą iskiernika kulowego a napięcie niskie za pomocą woltomierza elektromagnetycznego przy dwóch odległościach kul 1 i 2 cm. Powtórz pomiar dla odległości kul 1 cm wraz z dołączonym woltomierzem elektrostatycznym.
Skorzystaj z charakterystyki iskiernika kulowego do wyznaczenia wysokiego napięcia. Uwaga: charakterystyka ta podana jest dla normalnych warunków atmosferycznych.
Wykonaj korektę wyznaczonych napięć do rzeczywistych warunków atmosferycznych.
3. Oblicz przekładnię transformatora z obydwu pomiarów (odległości kul iskiernika). Uwaga: napięcie przebicia wyznaczone zostało w kV_{peak} a napięcie niskie zmierzone zostało w V_{rms} .

1. 3. Pomiar za pomocą pojemnościowego dzielnika napięcia lub przekładnika napięciowego

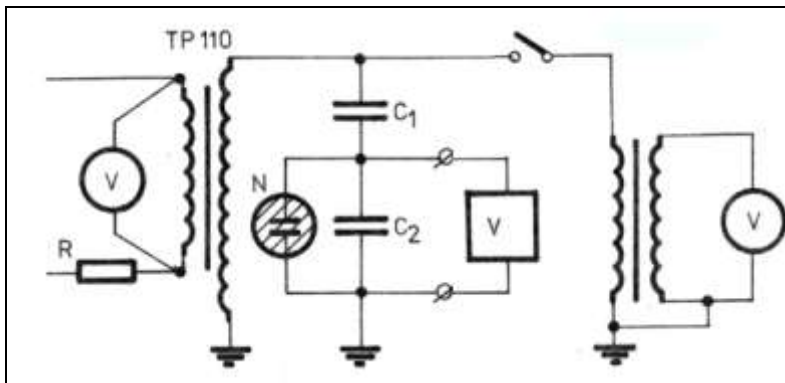
1. 3. 1 . Układ pomiarowy

Układ probierczy przedstawiony jest na rys. 4.



Rys. 4. Układ pomiarowy z pojemnościowym dzielnikiem napięcia i przekładnikiem napięciowym

- 1 – transformator wysokonapięciowy
- 2 – pojemnościowy dzielnik napięcia
- 3 – kondensator ciśnieniowy firmy Micafil
- 4 – przekładnik napięciowy
- 5 – kondensator dekadowy nn
- 6 – woltmierz cyfrowy
- 7 – woltmierz elektromagnetyczny
- 8 – oscyloskop cyfrowy



Rys. 5. Schemat ideowy układu probierczego z pojemnościowym dzielnikiem napięcia i przekładnikiem napięciowym

1. 3. 2. Spis przyrządów

- Transformator probierczy TP 110,
- Przekładnia znamionowa 500, 110 kV/220 V
- Moc znamionowa ciągła 10 kVA, Moc dorywcza (15 min) 40 kVA
- Znamionowy prąd wtórny 0,09 A, Prąd dorywczy wtórny (15 min) 0,36 A
- Napięcie probiercze 50 Hz (5 min) 143 kV niepewność przekładni napięciowej $\pm 5\%$
- Przekładnik napięciowy firmy ZWAWN Warszawa
- Napięcie znamionowe $U_n = 60$ kV Moc znamionowa $S_g = 2$ kVA
- Napięcie probiercze 50 Hz, 130 kV Napięcie probiercze 1,2/50 μ s, 325 kV
- $U_{2n} = \frac{100}{\sqrt{3}}$ V $S_{2n} = 120$ VA, klasa 0,5
- Przekładnia napięciowa $\frac{60}{\frac{\sqrt{3}}{100}} = 600$
- Kondensator ciśnieniowy $U_{max} = 190$ kV, $C_{1w} = 107,9$ pF, klasa 0,1, $\text{tg } \delta < 10^{-5}$.
- **Uwaga: Stosuj ten kondensator tylko do napięcia mniejszego od 90 kV !**
- Kondensator dekadowy nn $U_{max} = 250$ V, klasa 1
- Woltmierz cyfrowy z bardzo dużą rezystancją wejściową (do pomiaru z pojemnościowym dzielnikiem napięcia)
- Woltmierz elektromagnetyczny (do pomiaru z przekładnikiem napięciowym)
- Woltmierz z wyświetlaczem cyfrowym Lumel N15Z, 300 V, $R > 2$ M Ω , niepewność $0,5\% \pm 1$ cyfra znacząca

- Oscyloskop cyfrowy

1. 3. 3. Zadania pomiarowe

1. Dobierz wartość kondensatora nn tak aby przekładnia dzielnika napięciowego była równa (około) 10 000.
2. Nastaw wartość wysokiego napięcia na 30 kV i zmierz napięcie niskie na pojemnościowym dzielniku napięcia i na przekładniku napięciowym. Oblicz przekładnię napięciową transformatora ze wskazań obydwu woltomierzy. Zaobserwuj kształt krzywej napięcia na oscyloskopie.
3. Zwiększ wysokie napięcie do wartości znacznie wyższej od $60 \text{ kV} / \sqrt{3}$ (ale mniejszej od 60 kV). Obserwuj kształt krzywej napięcia. Oblicz ponownie przekładnię napięciową transformatora ze wskazań obydwu woltomierzy.

1. 4. Zawartość sprawozdania

- Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego
- Spis przyrządów z ich najważniejszymi danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
- Tabele pomiarowe z wynikami obliczeń, przykłady obliczeń
- Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego

1. 5. Pytania kontrolne

1. Parametry napięcia przemiennego
2. Konstrukcje transformatorów probierczych
3. Przykład prostego układu probierczego
4. Metody regulacji amplitudy wysokiego napięcia przemiennego
5. Przepięcia w układach probierczych
6. Rezystory tłumiące przepięcia i rezystory ograniczające prąd zwarciovoy
7. Pomiary wysokich napięć
8. Konstrukcja kondensatorów ciśnieniowych

1. 6. Literatura

- [1] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 5
 [2] Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1999, rozdział 1, 6, 7, 9

ĆWICZENIE 1: UKŁAD PROBIERCZY I POMIARY WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

Data pomiarów :

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne: T =°C, p = hPa, RH =%

$\delta =$

Tabela 1. Pomiary iskiernikiem kulowym

Nr	a	U_1	$U_{1\text{śr}}$	U_{2N}	U_{2pT}	η	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	-	
1	1						
2							
3							
1	1					-	Z woltomierzem elektrostatycznym
2						-	
3						-	
1	2						
2							
3							
Wartość średnia przekładni transformatora $\eta =$							

U_1 - napięcie niskie nn, $U_{1\text{śr}}$ - wartość średnia nn (z trzech kolejnych prób)

U_{2N} - wartość wysokiego napięcia WN dla normalnych warunków atmosferycznych odczytana z charakterystyki iskiernika kulowego

U_{2pT} - wartość WN skorygowana do rzeczywistych warunków atmosferycznych podczas pomiaru

η - przekładnia transformatora a - odstęp elektrod iskiernika kulowego

Tab. 2. Pomiary za pomocą pojemnościowego dzielnika napięcia i przekładnika napięciowego

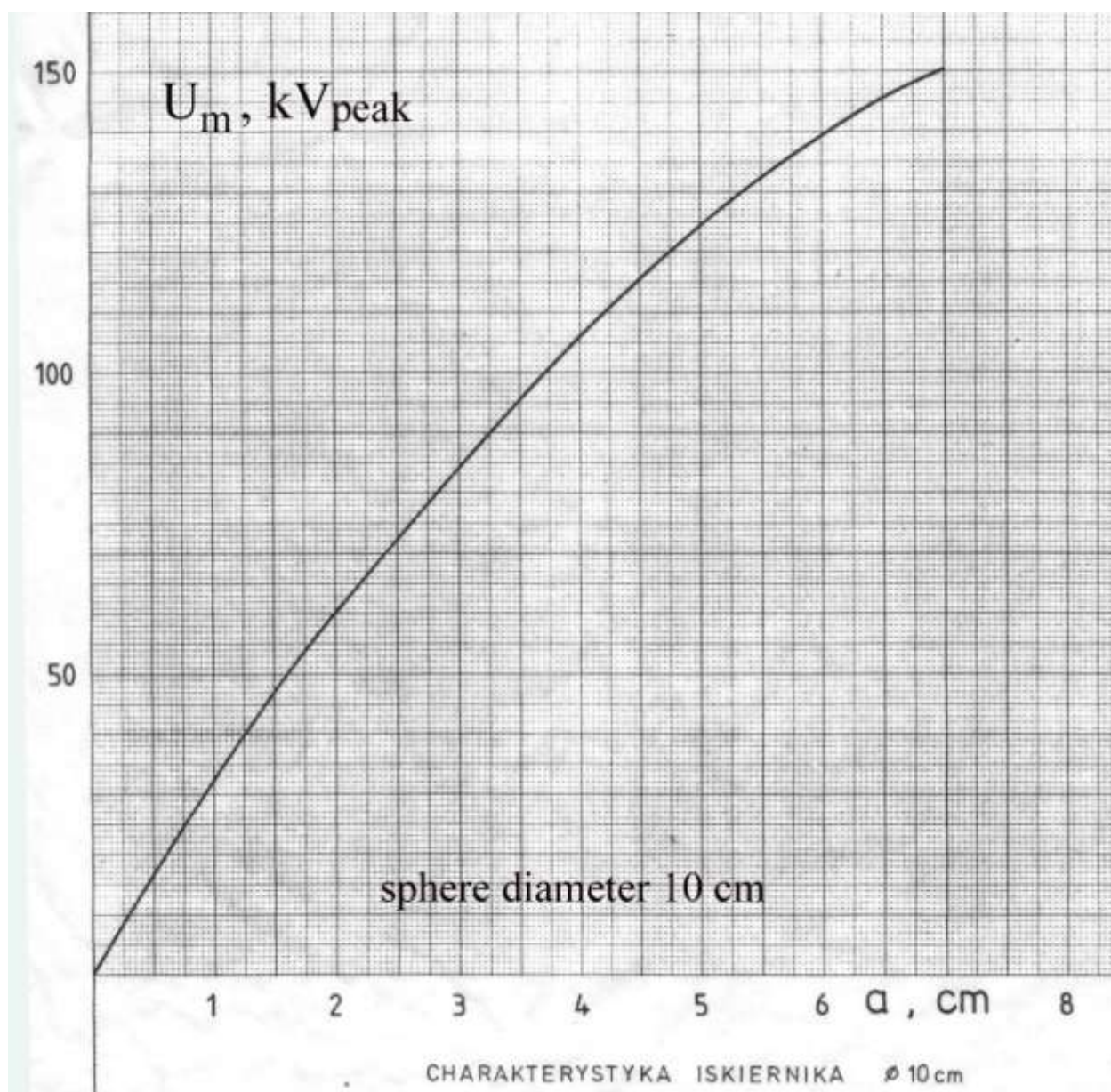
Nr	Pojemnościowy dzielnik napięcia			Przekładnik napięciowy			
	U_{1T} V	U_1 V	U_2 kV	η_{tc} -	U_1 V	U_2 kV	η_{tP} -
1							
2							

U_1 - niskie napięcie dzielnika lub przekładnika, U_{1T} - niskie napięcie transformatora

U_2 – wysokie napięcie

η_{tc} – przekładnia transformatora obliczona z pomiaru za pomocą pojemnościowego dzielnika napięcia

η_{tP} - przekładnia transformatora obliczona z pomiaru za pomocą przekładnika napięciowego



Rys. 6. Charakterystyka iskiernika kulowego o średnicy kul 10 cm

ĆWICZENIE II

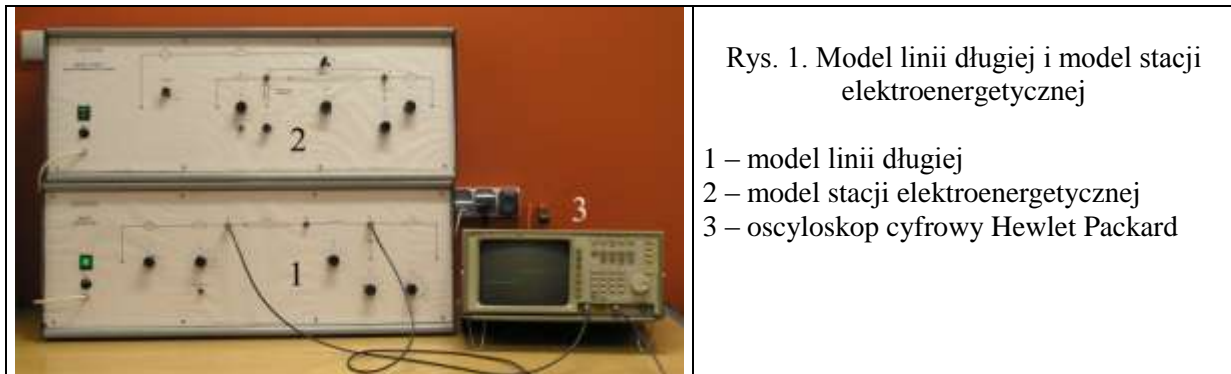
PRZEBIEGI FALOWE I MODEL LINII DŁUGIEJ

6. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wykonanie pomiarów i obliczeń amplitudy przebiegów falowych na modelu linii długiej a także zbadanie takich zjawisk jak odbicie, superpozycja oraz eliminacja impedancji falowej.

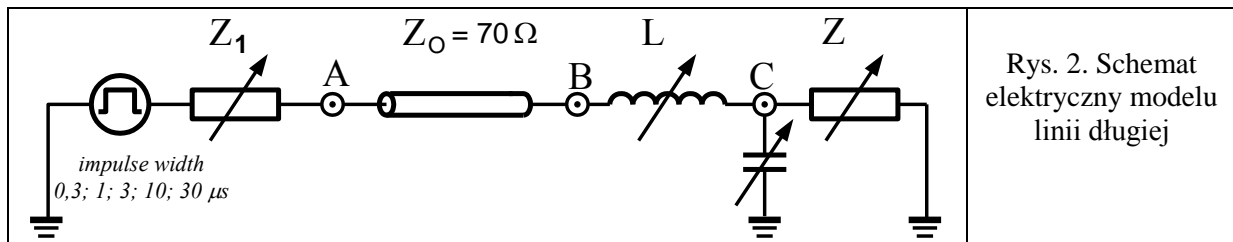
6. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonywane są na stanowisku pokazanym na rys. 1. Schemat elektryczny modelu linii długiej przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Model linii długiej i model stacji elektroenergetycznej

- 1 – model linii długiej
- 2 – model stacji elektroenergetycznej
- 3 – oscyloskop cyfrowy Hewlett Packard



Rys. 2. Schemat elektryczny modelu linii długiej

6. 3. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1.	Zapoznaj się z instrukcją obsługi modelu linii długiej i oscyloskopu cyfrowego. Ustaw następujące wartości elementów modelu $Z_1 = Z_2 = 70 \Omega$, $L = 0$, $C = 0$, zmierz amplitudę fali pierwotnej wytwarzanej przez generator (fali postępującej) - u_1' . Zmierz czas propagacji fali przez kabel, od punktu A do punktu B. Oblicz długość kabla zakładając, że szybkość fali w kablu $v = 150 \text{ m}/\mu\text{s}$.
2.	Ustaw następujące wartości elementów modelu $Z_1 = 70 \Omega$, $L = 0$, $C = 0$ a) zamodeluj przejście fali z kabla elektroenergetycznego do linii napowietrznej ($Z_2 = 500 \Omega$) a następnie b) przypadek odwrotny. Niestety w tym modelu nie można zmieniać wartości impedancji kabla Z_0 . Dlatego ustaw $Z_2 = 10 \Omega$ (stosunek $500/70 \Omega \cong 70/10 \Omega$). Wyznacz eksperymentalnie współczynniki przejścia α_{02} w punkcie B dla przypadku a) i b) (mierząc amplitudy fal) Porównaj wartości α_{02} wyznaczone eksperymentalnie z wartościami teoretycznymi, obliczonymi z wzorów zawierających odpowiednie wartości Z_0 i Z_2 .
3.	Ustaw $Z_1 = Z_2 = 70 \Omega$, zbadaj wpływ szeregowej indukcyjności L i równoległe włączonej pojemności kondensatora C na kształt fali w punkcie B. Wyjaśnij to zjawisko.

4.	Zbadaj zjawisko zwane eliminacją impedancji falowej przy połączeniu linii napowietrznej ($Z_1 = 500 \Omega$) z transformatorem ($Z_2 = 2000 \Omega$) poprzez krótki odcinek linii kablowej ($Z_0 = 70 \Omega$). Zmierz amplitudy dla trzech odbić oraz amplitudę stanu końcowego.
----	---

6. 4. Informacje dodatkowe

Amplitudę u'_2 fali przechodzącej z linii o impedancji falowej Z_1 do linii o impedancji falowej Z_2 można obliczyć za pomocą wzoru:

$$u'_2 = \alpha_{12} \cdot u'_1 \quad \text{gdzie: } u'_1 - \text{amplituda fali biegnącej do punktu połączenia}$$

$$\alpha_{12} - \text{współczynnik przejścia fal z linii } Z_1 \text{ do linii } Z_2$$

$$\alpha_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Amplituda fali odbitej:

$$u''_1 = u'_2 - u'_1 \quad u''_1 = \beta_{12} \cdot u'_1 \quad \text{gdzie: } \beta_{12} - \text{współczynnik odbicia fal w węźle}$$

$$\beta_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

6. 5. Zawartość sprawozdania

- Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego
- Spis przyrządów z ich najważniejszymi danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
- Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego
- Wyniki pomiarów, rysunki obserwowanych fal i wyniki obliczeń, przykłady obliczeń
- Wartości współczynników przejścia wyznaczone eksperymentalnie i obliczone z odpowiednich wartości impedancji falowych.
- Sprawdź czy zmierzona amplituda fali w węźle B w stanie ustalonym, przy badaniu zjawiska eliminacji impedancji falowej, jest zbliżona do amplitudy fali obliczonej bezpośrednio z wartości impedancji Z_1 i Z_2 . Czyli przy bezpośrednim połączeniu linii Z_1 z linią Z_2 .
- Wnioski

6. 6. Pytania kontrolne

1.	Przebiegi w systemie elektroenergetycznym
2.	Obwód z parametrami skupionymi i z parametrami rozłożonymi
3.	Definicja impedancji falowej
4.	Związek pomiędzy falą prądową i falą napięciową, graficzne przedstawienie fal
5.	Przypadek I: Przejście fali z linii o impedancji falowej Z_1 do linii o impedancji falowej Z_2 , podaj wzory na współczynnik przejścia i współczynnik odbicia.
6.	Przypadek II: linia otwarta na końcu.
7.	Przypadek III: linia zwarta na końcu (uziemia).
8.	Tłumienie i odkształcenie fal w rzeczywistych liniach elektroenergetycznych.
9.	Zjawisko eliminacji impedancji falowej.

6. 7. Literatura

[1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wroclawska

1980, rozdz. 12

[2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 1; 5.3.5; 5.3.6

[3] von Hippel A., Dielektryki i fale. PWN Warszawa 1963, cz. I, rozdz. 25, 26

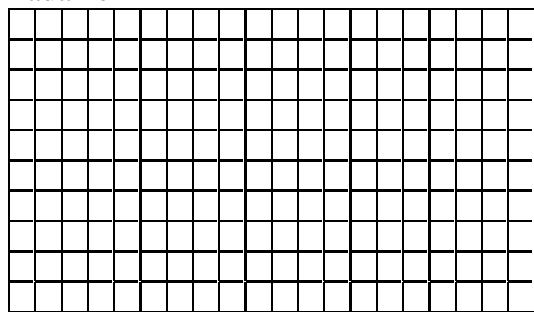
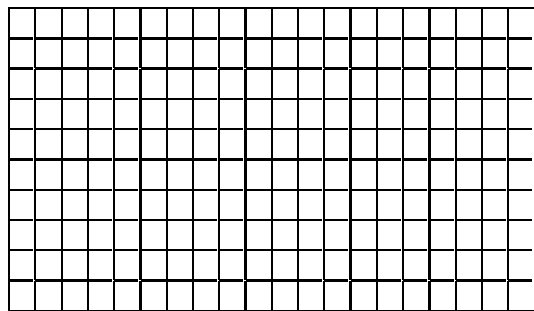
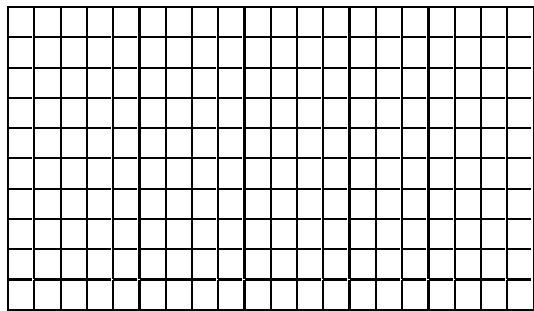
ĆWICZENIE II: PRZEBIEGI FALOWE I MODEL LINII DŁUGIEJ

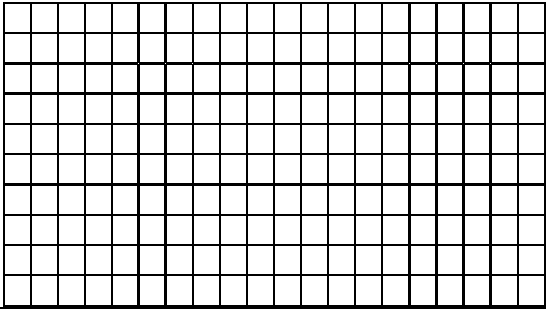
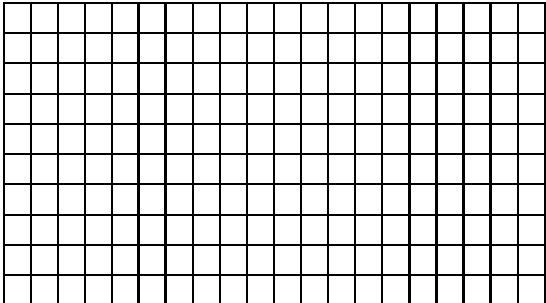
Data pomiarów

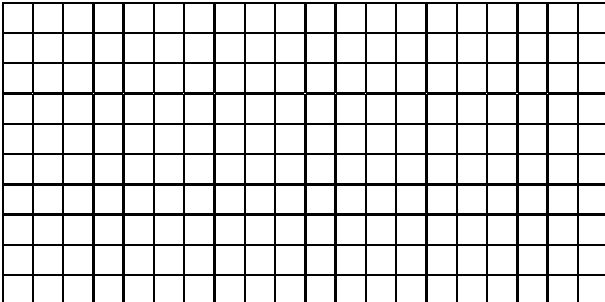
Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Obserwowane kształty przebiegów	Parametry modelu	Wartości mierzone
Zadanie 1 	Z1 = Z2 = L = C =	
Zadanie 2a 	Z1 = Z2 = L = C =	
Zadanie 2b 	Z1 = Z2 = L = C =	

Obserwowane kształty przebiegów	Parametry modelu	Wartości mierzone
Zadanie 3 	Z1 = Z2 = L = C =	
Zadanie 4 	Z1 = Z2 = L = C =	



ĆWICZENIE III

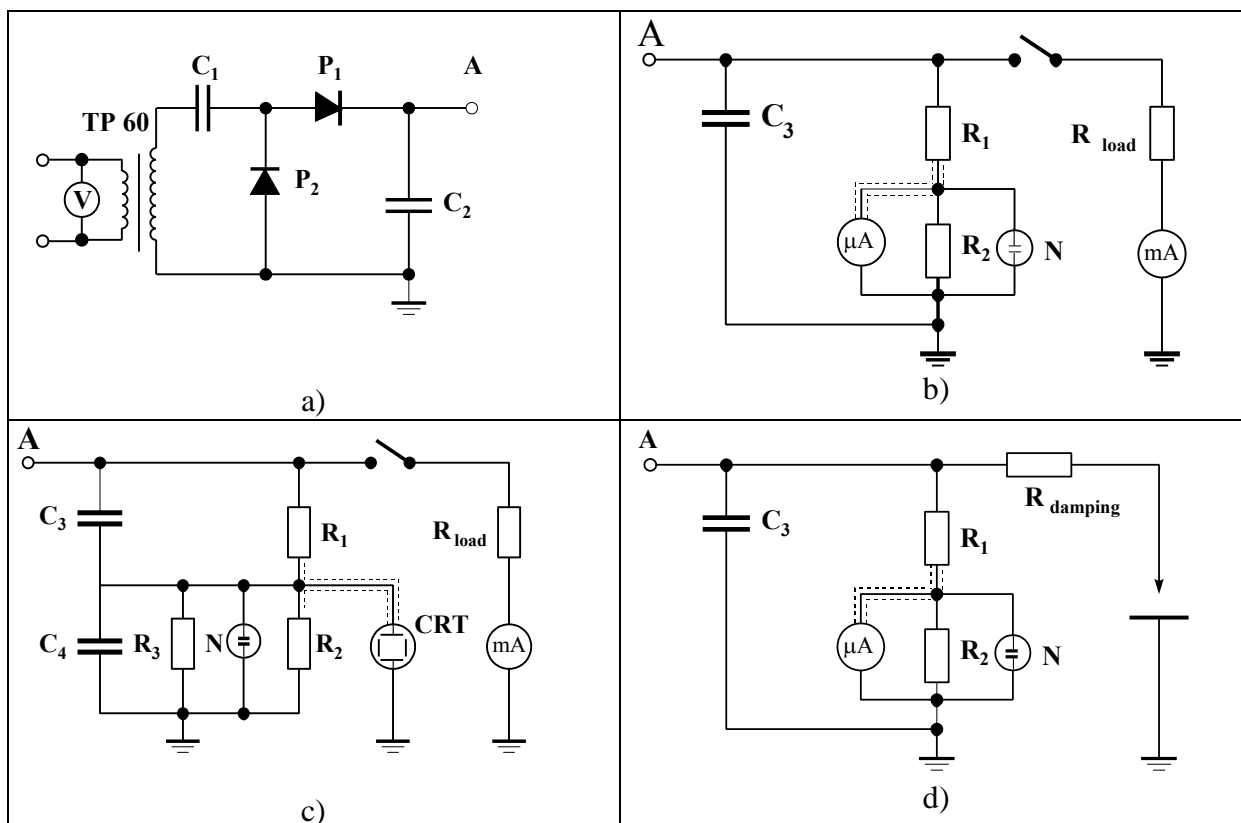
WYTWARZANIE I POMIAR NAPIĘCIA STAŁEGO

7. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z układem Greinachera i przeprowadzenie pomiarów napięcia stałego w zależności od obciążenia źródła. Dodatkowo należy zbadać wpływ biegunowości na napięcie przebicia iskiernika ostrze – płyta.

7. 2. Układ pomiarowy

Pomiary przeprowadza się na stanowisku przedstawionym na rys 1.



Rys. 2. Obwody elektryczny Greinachera (a) i stosowanych układów pomiarowych (b, c, d).

$C_1 = C_2 = 50 \text{ nF}$, Rezystor tłumiący = $6 \text{ k}\Omega$, Rezystor obciążenia = $25 \text{ M}\Omega$
 $C_3 = 2,35 \text{ nF}$, $C_4 = 2,286 \text{ mF}$, $R_1 = 100 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 85 \text{ k}\Omega$ - elementy dzielników napięcia

7. 3. Spis przyrządów

- Transformator TP60, przekładnia napięciowa $\eta = 60\text{kV}/220 \text{ V} = 273$
- Mikroamperomierz magnetoelektryczny LM-3 klasa 0,5
- Cyfrowy miernik uniwersalny VC 8045 - II
- Miliamperomierz magnetoelektryczny LM-1 klasa 0,5,
- Cyfrowy woltomierz tablicowy Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1 \text{ digit}$
- Oscyloskop OKD-514 A, 0 – 14 MHz

7. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1	Zapoznaj się z układem napięcia stałego (rys. 1a) i z układami pomiarowymi (rys. 1a, b, c), następnie oblicz: <ul style="list-style-type: none"> - stałą napięciową „c” układu pomiarowego przedstawionego na rys. 2b wyrażoną w jednostkach $\text{kV}/\mu\text{A}$ - prąd płynący przez rezystancję R_1 (rys. 2b) i napięcie U_1 na niskiej stronie transformatora jeśli napięcie stałe wynosi 100 kV. - przyjmij że: <ul style="list-style-type: none"> - układ prostownikowy Greinachera podnosi dwukrotnie amplitudę - napięcie przemiennie jest idealną sinusoidą (stosunek amplitudy do wartości skutecznej = $\sqrt{2}$. przekładnia napięciowa transformatora = 273.
2	Zmierz zależność wysokiego napięcia stałego HVDC od przemiennego napięcia na niskiej stronie transformatora TP60 (zastosuj układ pomiarowy pokazany na rys. 2b) <ul style="list-style-type: none"> - Przeprowadź pomiary z rezystancją obciążenia R_{load}, prąd obciążenia nie powinien być większy od 2 mA - Przeprowadź pomiary bez rezystancji obciążenia ale w tym samym zakresie napięcia po stronie pierwotnej transformatora U_1 (HVDC nie powinno być większe od 75 kV)
3	Wyznacz współczynnik pulsacji napięcia stałego z załączonym rezystorem obciążającym R_{load} i bez obciążenia (zastosuj układ pomiarowy z rys. 2c). Wykonaj pomiary dla dwóch wartości napięcia podobnie jak w poprzednim punkcie.
4	Zmierz napięcie początkowe jonizacji i napięcie przebicia przy biegunowości dodatniej i ujemnej iskiernika ostrze – płyta dla odległości elektrod 2,5 cm. (zastosuj układ pomiarowy z rys. 2d)

7. 5. Zawartość sprawozdania

- Cel ćwiczenia, zastosowane układy pomiarowe
- Spis przyrządów z ich najważniejszymi danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
- Tabele pomiarowe z wynikami obliczeń, przykłady obliczeń
- Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego
- Wstępne obliczenia z zadania 1.
- Wyniki pomiarów z zadania 2 przedstaw na jednym rysunku.
- Narysuj lub sfotografuj oscylogramy pulsacji napięcia.

7. 6. Pytania kontrolne

1. Parametry źródeł wysokiego napięcia stałego i ich zastosowania
2. Jednostopniowy układ napięcia stałego Greinachera
3. Kaskada Greinachera HVDC
4. Woltomierz elektrostatyczny
5. Dzielniki stosowane do pomiaru napięcia stałego
6. Wpływ biegunowości na napięcie początkowe jonizacji i napięcie przebicia iskiernika ostrze – płyta.

7. 7. Literatura

- [1] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 5.1.2; 2.1.3
- [3] Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1999, rozdział 2; 9

ĆWICZENIE III: WYTWARZANIE I POMIAR NAPIĘCIA STAŁEGO

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$, $p = \dots\dots\dots \text{hPa}$, $\text{RH} = \dots\dots\dots\%$

$\delta =$

TABELA 1. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI NAPIĘCIA STAŁEGO

	U_1	I	c	U_2	Uwagi
	V	μA	kV / μA	kV	
1	z obciążeniem $I_{\text{load}} = \dots\dots\dots$
2	
3	
4	
5	
1	bez obciążenia
2	
3	
4	
5	

- U_1 – napięcie pierwotne (niskie) transformatora
- I – prąd płynący przez rezystor $R_1 = 100 \text{ M}\Omega$
- c - stała napięciowa badanego układu, jest to napięcie stałe równoważne prądowi $1 \mu\text{A}$ płynącemu przez rezystor $R_1 = 100 \text{ M}\Omega$
- I_{load} – prąd obciążenia płynący przez $R = 25 \text{ M}\Omega$

Tabela 2. Wyznaczenie współczynnika pulsacji

	U_1	$U_{1=}$	η_R	$U_{2=}$	$U_{\max} - U_{\min}$	η_C	$U_{2\max} - U_{2\min}$	S	Uwagi
	V	V	-	kV	V		kV	%	
1									
2									
1									
2									

U_1 – napięcie pierwotne (niskie) transformatora

$U_{1=}$ - składowa stała wyprostowanego napięcia zmierzona za pomocą oscyloskopu

$U_{2=}$ - składowa stała wyprostowanego napięcia obliczona, $U_{2=} = U_{1=} \cdot \eta_R$

$U_{\max} - U_{\min}$ - podwójna amplituda pulsacji wyprostowanego napięcia zmierzona oscyloskopem

$U_{2\max} - U_{2\min} = (U_{\max} - U_{\min}) \cdot \eta_C$

$S = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2 \cdot U_{=}} \cdot 100\%$ - współczynnik pulsacji wyprostowanego napięcia

η_R – przekładnia rezystancyjnego dzielnika napięcia

η_C - przekładnia pojemnościowego dzielnika napięcia

Tabela 3. Charakterystyka iskiernika ostrze - płyta $U_0 = f(s)$ i $U_b = f(s)$

	s	I_0	U_0	I_b	U_b	U_{bN}	Uwagi
	cm	μA	kV	μA	kV	kV	
1							
2							
3							
1							
2							
3							
1							
2							
3							
1							
2							
3							

U_0 – napięcie początkowe jonizacji

U_b - napięcie przebicia w rzeczywistych warunkach atmosferycznych

U_{bN} - napięcie przebicia skorygowane do normalnych warunków atmosferycznych

ĆWICZENIE IV

PRZEBICIE POWIETRZA W POLU RÓWNOMIERNYM LUB SŁABO NIERÓWNOMIERNYM

2. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pomiar napięcia jonizacji lub napięcia przebicia w 3 układach elektrod: płyta – płyta, płyta – płyta z dielektrykiem i cylindrów współśrodkowych.

2. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonywane są w układzie przedstawionym na rys. 1.

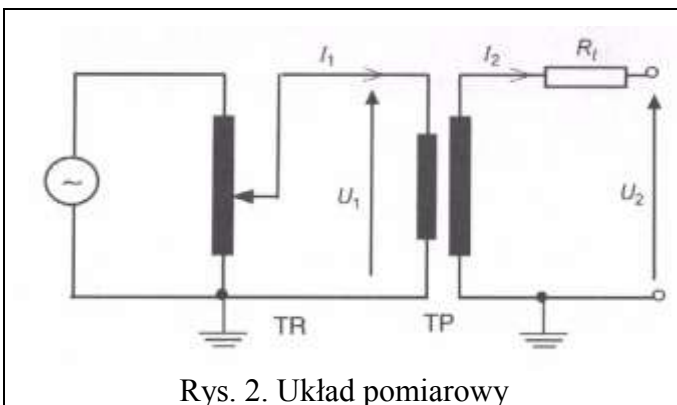


Rys. 1. Układ pomiarowy

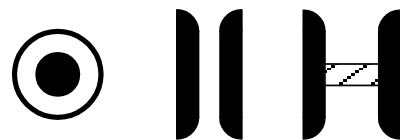
- 1 – transformator 110 kV
- 2 – pojemnościowy dzielnik napięcia
- 3 – izolator wsporeczy
- 4 – walce współśrodkowe
- 5 – iskiernik płyta - płyta
- 6 – woltomierz elektromagnetyczny
- 7 – impedancja RLC
- 8 – iskiernik ostrze - ostrze

2. 3. Spis przyrządów

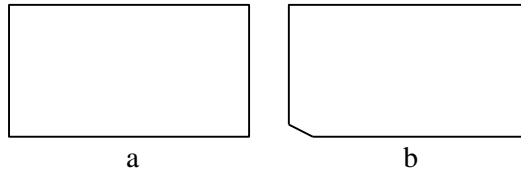
- Transformator probierczy TP 110, przekładnia napięciowa $\eta = 475$
- Rezystor tłumiący 480Ω
- Woltomierz z wyświetlaczem cyfrowym Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1 \text{ digit}$
- Woltomierz elektromagnetyczny



Rys. 2. Układ pomiarowy



Rys. 3. Układy elektrod



Rys. 4. Płytki izolacyjne wkładane do iskiernika płyta-płyta.

a – zapewniająca dobry kontakt z elektrodą, b – ze złym kontaktem dielektryk-elektroda

2. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

- Zmierz napięcie przebicia iskiernika płyta – płyta dla odstępów elektrod **0,26 cm, 1 cm i 3 cm**. Dla przyjętych odległości elektrod wyznacz wartości napięcia przebicia według wzoru Ritza. Porównaj wyniki pomiaru i obliczeń na wspólnym rysunku.
- Zmierz napięcie iskiernika płyta – płyta przy takiej samej odległości elektrod dla 3 przypadków
 - bez płytki izolacyjnej
 - z prostokątną płytką izolacyjną
 - z prostokątną płytką izolacyjną ze ściętym narożnikiem
- Zmierz napięcie jonizacji początkowej i napięcie przebicia w układzie walców koncentrycznych z elektrodami wewnętrznymi o różnych średnicach: **1, 3, 8, 12, 20, 25, 35 i 55 mm**. Średnica elektrody zewnętrznej wynosi **75 mm**. Określ napięcie jonizacji początkowej metodą akustyczną. Wykreśl zależność napięcia początkowego jonizacji U_0 i napięcia przebicia U_P w zależności od promienia elektrody wewnętrznej. Przy jakim stosunku R / r występuje maksimum oraz minimum tej funkcji ?
Oblicz jak zmienia się największe pole elektryczne w iskierniku walcowym przy różnych promieniach elektrody wewnętrznej ($r = 0,5; 1,5; 4; 6; 10; 12,5; 17,5$ i $27,5$ mm, $R = 37,5$ mm) gdy napięcie $U = 10$ kV (jest to napięcie niższe od napięcia początkowego jonizacji przy elektrodzie wewnętrznej o najmniejszej średnicy zastosowanej w tym eksperymencie).

2. 4. Informacje dodatkowe

Wzór eksperymentalny na napięcie przebicia powietrza w polu równomiernym wg Ritza

$$U_P = 24,55 \cdot a + 6,66 \cdot \sqrt{a} \quad (1)$$

gdzie:

U_P – napięcie przebicia w kV_P (wartość szczytowa) dla normalnych warunków atmosferycznych
 a – odstęp elektrod w cm

Współczynnik nierównomierności pola elektrycznego

$$\beta = \frac{E_{\max}}{E_{\text{sr}}} = \frac{E_{\max}}{\frac{U}{a}} \quad (2)$$

gdzie: E_{\max} – największe natężenie pola elektrycznego
 E_{sr} – średnia wartość pola elektrycznego

Maksymalne natężenie pola elektrycznego w układzie walców koncentrycznych

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (3)$$

gdzie: R – promień zewnętrzny (wartość stała = 75 mm)
 r – promień wewnętrzny (zmienny)
 U – napięcie, przyjmij wartość stałą równą 10 kV (jest to napięcie mniejsze od napięcia początkowego jonizacji U_0).

2. 5. Zawartość sprawozdania

1. Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego.
2. Spis przyrządów z ich danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
3. Wyniki pomiarów oraz wyniki obliczeń, przykłady obliczeń, wnioski.
4. Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego.
5. Narysuj wykres $U_p = f(a)$ dla iskiernika płyta-płyta, wykres $U_p = f(r)$ dla iskiernika walcowego i $E_{\max} = f(r)$ dla napięcia $U = 10 \text{ kV}$

2. 6. Pytania kontrolne

1. Podaj definicję współczynnika niejednorodności pola elektrycznego β , napisz wzór na wartość średnią pola elektrycznego pomiędzy elektrodami iskiernika.
2. Przebieg w polu jednorodnym i niejednorodnym.
3. Wyjaśnij terminy: jarzenie, strimer, lider, łuk.
4. Prawo Paschena.
5. Normalne warunki atmosferyczne.
6. Korekta napięcia przebiecia ze względu na warunki atmosferyczne.
7. Profil Rogowskiego.
8. Optymalny stosunek promieni elektrod w układzie walców koncentrycznych

2. 7. Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wrocławska 1980, rozdz. 6, 7
- [2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 2

ĆWICZENIE IV: PRZEBICIE POWIETRZA W POLU RÓWNOMIERNYM LUB SŁABO NIERÓWNOMIERNYM

Data pomiarów:

1. Sprawozdawca

2. Student

3. Student

4. Student

5. Student

6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne T =°C, p = hPa, RH =%

$\delta =$

Tabela 1. Pomiar napięcia przebicia układu płyta - płyta

Nr	a	U ₁	U ₁ śr	U _{2PT}	U _{2PN}	η	E _{PT}	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	-	kV/cm	
1	0,26							
2								
3								
1	1							
2								
3								
1	3							
2								
3								

U₁ - niskie napięcie nn

U₁ śr - wartość średnia nn (z trzech kolejnych prób)

U_{2PT} - napięcie przebicia w rzeczywistych warunkach atmosferycznych, U_{2PT} = U₁śr · η

U_{2PN} - wysokie napięcie skorygowane do normalnych warunków atmosferycznych

η - przekładnia transformatora a (s) – odległość elektrod

$E_{PT} = \frac{U_{2PT}}{a}$ - natężenie pola elektrycznego bezpośrednio przed przebiciem

Tabela 2. Pomiar napięcia przebicia układu płyta – płyta z dielektrykiem

Nr	a	U_1	$U_{1\text{śr}}$	$U_{2\text{PT}}$	$U_{2\text{PN}}$	η	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	-	
1							bez płytki dielektrycznej
2							
3							
1							z płytką prostokątną
2							
3							
1							z płytką o ściętym narożniku
2							
3							

Tabela 3. Pomiar w układzie walców koncentrycznych

Nr	d	U_o	U_o średnia	U_o	U_P	U_P średnia	U_{PN}	E_{max} U=10kV	Uwagi
	mm	V	V	kV	V	V	kV	kV/cm	
1	1								
2									
3									
1	3								
2									
3									
1	8								
2									
3									
1	12								
2									
3									
1	20								
2									
3									
1	25								
2									
3									
1	35								
2									
3									
1	55								
2									
3									

E_{max} – obliczone maksymalne natężenie pola elektrycznego z równania (3), przy $U = 10 \text{ kV}$

U_o – napięcie początkowe jonizacji

U_P – Napięcie przebicia w rzeczywistych warunkach atmosferycznych

U_{PN} – Napięcie przebicia w normalnych warunkach atmosferycznych (po skorygowaniu wyników pomiaru)

ĆWICZENIE V

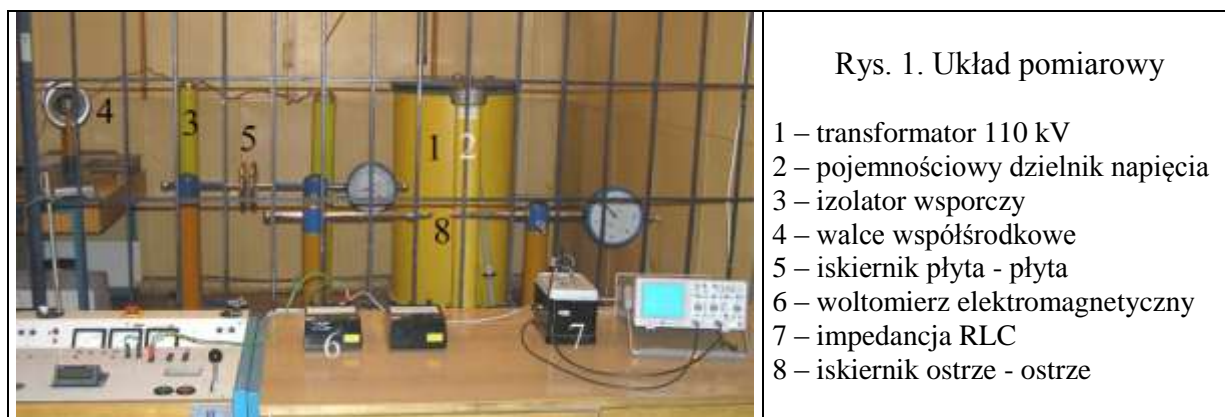
PRZEBICIE POWIETRZA W POLU NIERÓWNOMIERNYM

2. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pomiar napięcia jonizacji lub napięcia przebicia w 2 układach elektrod: ostrze – ostrze i ostrze – ostrze z barierą dielektryczną.

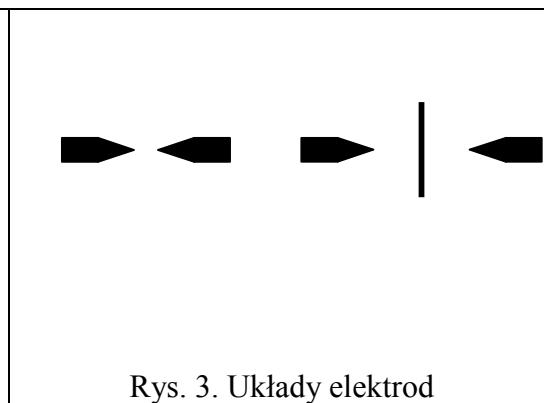
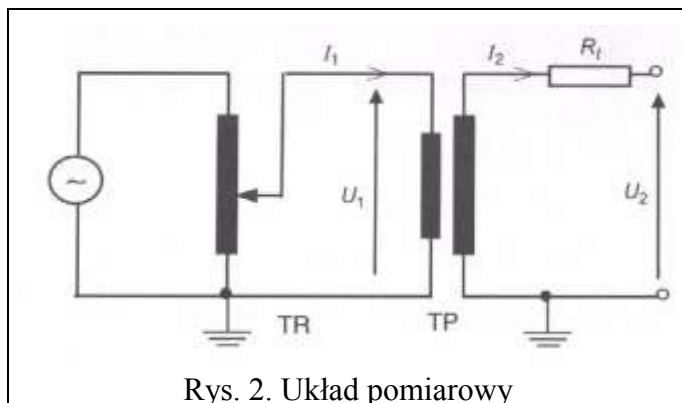
2. 2. Układ pomiarowy

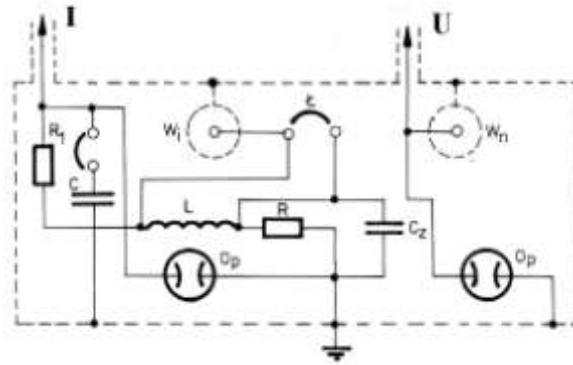
Pomiary wykonywane są w układzie przedstawionym na rys. 1.



2. 3. Spis przyrządów

- Transformator probierczy TP 110, przekładnia napięciowa $\eta = 475$
- Rezystor tłumiący 480Ω
- Woltomierz z wyświetlaczem cyfrowym Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 M\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1$ digit
- Woltomierz elektromagnetyczny
- Oscyloskop
- Impedancja RLC (opis i parametry zamieszczone są na rys. 4)





Rys. 4. Schemat ideowy impedancji RLC stosowanej do pomiaru napięcia jonizacji i prądu wyładowań niezupełnych w układzie ostrze – ostrze.

- I – połączenie z elektrodą iskiernika, W_i – kabel do połączenia z oscyloskopem, sygnał prądowy (przy zwartej zworze do oscyloskopu doprowadzany jest spadek napięcia na rezystancji R)
 U – połączenie z dzielnikiem napięciowym, W_n – kabel do połączenia z oscyloskopem, sygnał napięciowy, L – Zwora zwarciowa
 O_p – elementy ochrony przed przepięciem (iskierniki gazowane)
 R_1 – 2000 Ω , L = 3 mH, C - 100 nF, C_Z - 100 nF.

2. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

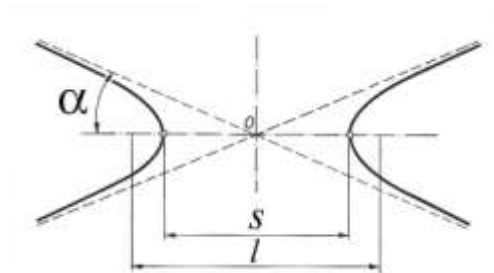
- Zmierz napięcie jonizacji początkowej i napięcie przebicia w układzie ostrze – ostrze w zależności od odległości elektrod. Wykonaj pomiary przy odległościach **2, 6, 12, 22** cm. Określ napięcie początkowe metodą optyczną przy zaciemnionym pomieszczeniu.
- Zmierz wpływ cienkiej bariery dielektrycznej na napięcie przebicia iskiernika ostrzowego
 Ustaw odległość elektrod równą 10 cm i zmierz napięcie przebicia dla 4 przypadków:
 - bez bariery
 - z barierą w odległości 1 cm od elektrody wysokonapięciowej
 - z barierą w odległości 1 cm od elektrody uziemionej
 - z barierą w środku odstępów międzyelektrodowego
- Dołącz impedancję RLC do iskiernika ostrze – ostrze i określ napięcie początkowe jonizacji dla biegunowości dodatniej i biegunowości ujemnej napięcia. Pomiar ten wykonaj dla odległości elektrod 12 cm. Nie dopuść do wystąpienia przebicia, nie zwiększaj napięcia powyżej wartości 80% napięcia przebicia. Przebicie może spowodować uszkodzenie impedancji RLC i oscyloskopu.
- Oblicz napięcia przebicia układu ostrze – ostrze ze wzoru BBC dla odległości stosowanych w pomiarach wg punktu 1. Porównaj wyniki pomiaru i obliczeń na jednym rysunku.
- Oblicz maksymalne wartości pola elektrycznego w układzie ostrze – ostrze dla tych samych odległości 2, 6, 12 i 22 cm zakładając, że kąt ostrza $\alpha = 6^\circ$, narysuj zależność $E_{\max} = f(s)$.

2. 4. Informacje dodatkowe

Wzór BBC dla układu ostrze – ostrze, niesymetrycznym napięciowo (jedna elektroda uziemiona) dla odległości elektrod $s > 6$ cm i dla następujących warunków atmosferycznych: $T = 293$ K, $p = 950$ hPa, wilgotność bezwzględna 13 g/m^3 .

$$U_p = 3,16 \cdot s + 14 \quad (1)$$

gdzie U_p jest napięciem przebicia w kV_{rms} a s jest odległością elektrod ostrzowych w cm.



Rys. 5. Model elektrod iskiernika ostrzowego jako obrotowych hiperboloid

Maksymalne natężenie pola elektrycznego w układzie strze – ostrze można obliczyć po przedstawieniu elektrod jako hiperboloid. Przekrój takiej bryły obrotowej wyznacza hiperbola o osi “s” i odległości dwóch ognisk “l”. Kąt α wyznaczony jest pomiędzy osią l a asymptotą przecinającą punkt O (rys. 5).

$$E_{\max} = E_{\text{mean}} \cdot \beta = \frac{U}{s} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha \cdot \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha \cdot \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

Dla małego kąta ($\alpha < 7^\circ$), wzór (2) można uprościć do:

$$E_{\max} = \frac{U}{s} \cdot \frac{1}{\alpha^2 \cdot \ln \frac{2}{\alpha}} \quad (4)$$

Oblicz E_{\max} dla $\alpha = 6^\circ$ (0,105 rad). Przy stosowaniu wzoru (4) należy podstawić wartość kąta α w radianach

2. 5. Zawartość sprawozdania

6. Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego.
7. Spis przyrządów z ich danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
8. Wyniki pomiarów oraz wyniki obliczeń, przykłady obliczeń, wnioski.
9. Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego.
10. Narysuj wykres $U_P = f(s)$ i $E_{\max} = f(s)$ dla iskiernika ostrzowego.

2. 6. Pytania kontrolne

1. Podaj definicję współczynnika nierównomierności pola elektrycznego β , napisz wzór na wartość średnią pola elektrycznego pomiędzy elektrodami iskiernika.
2. Przebieg w polu jednorodnym i niejednorodnym.
3. Wyjaśnij terminy: jarzenie, strimer, lider, łuk.
4. Wyładowania koronowe i ich skutki
- 5 Sposoby eliminacji wyładowań koronowych w liniach wysokich napięć
5. Normalne warunki atmosferyczne.
6. Korekta napięcia przebicia ze względu na warunki atmosferyczne.
7. Wpływ cienkiej dielektrycznej bariery na napięcie przebicia układów o polu nierównomiernym

2. 7. Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wrocławska 1980, rozdz. 6, 7
- [2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 2

ĆWICZENIE V: PRZEBICIE POWIETRZA W POLU NIERÓWNOMIERNYM

Data pomiarów:

Skład grupy

1. Sprawozdawca

2. Student

3. Student

4. Student

5. Student

6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$, $p = \dots\dots\dots \text{hPa}$, $\text{RH} = \dots\dots\dots\%$

$\delta =$

Tabela 1. Pomiar napięcia przebicia układu ostrze - ostrze

Nr	a	U_1	$U_{1\text{śr}}$	$U_{2\text{PT}}$	$U_{2\text{PN}}$	η	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	-	
1	2						
2							
3							
1	6						
2							
3							
1	12						
2							
3							
1	22						
2							
3							

U_1 - niskie napięcie nn

$U_{1\text{śr}}$ - wartość średnia nn (z trzech kolejnych prób)

$U_{2\text{PT}}$ - napięcie przebicia w rzeczywistych warunkach atmosferycznych, $U_{2\text{PT}} = U_{1\text{śr}} \cdot \eta$

$U_{2\text{PN}}$ - wysokie napięcie skorygowane do normalnych warunków atmosferycznych

η - przekładnia transformatora a (s) – odległość elektrod

Tabela 2. Wpływ bariery na napięcie przebicia w układzie ostrze – ostrze

Nr	a	U_1	$U_{1\text{śr}}$	U_{2PT}	U_{2N}	η	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	-	
1	10						bez bariery
2							
3							
1	10						bariera przy elektrodzie wysokonapięciowej
2							
3							
1	10						bariera przy elektrodzie uziemionej
2							
3							
1	10						bariera w środku
2							
3							

Tabela 3. Napięcie początkowe jonizacji wyznaczone za pomocą impedancji RLC i oscyloskopu

s	U_{o+}	U_{o+}	U_{o-}	U_{o-}
cm	V	kV	V	kV
12				

ĆWICZENIE VI

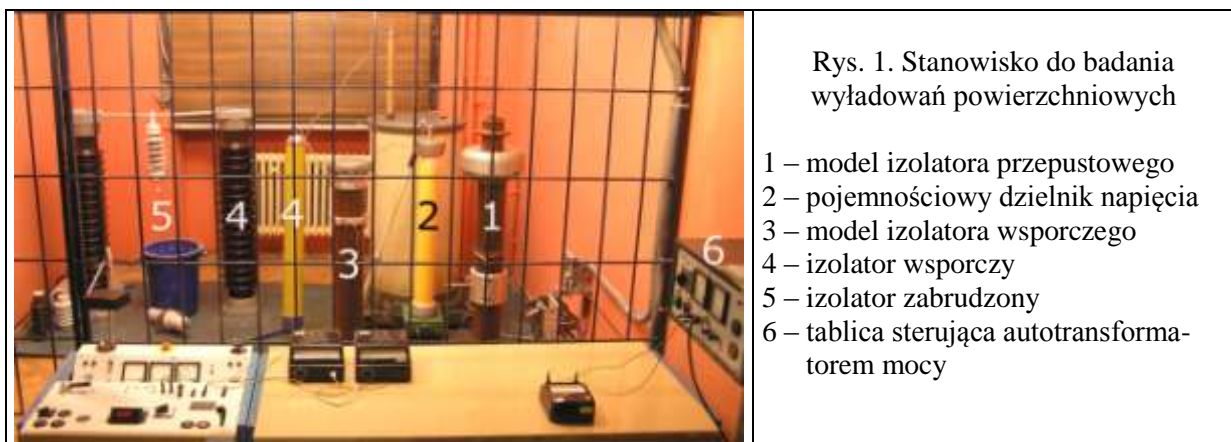
WYTRZYMAŁOŚĆ POWIERZCHNIOWA

3. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z różnymi formami wyładowań na trzech modelach izolatorów: izolatora wsporczeo, izolatora przepustowego i na zabrudzonym izolatorze porcelanowym.

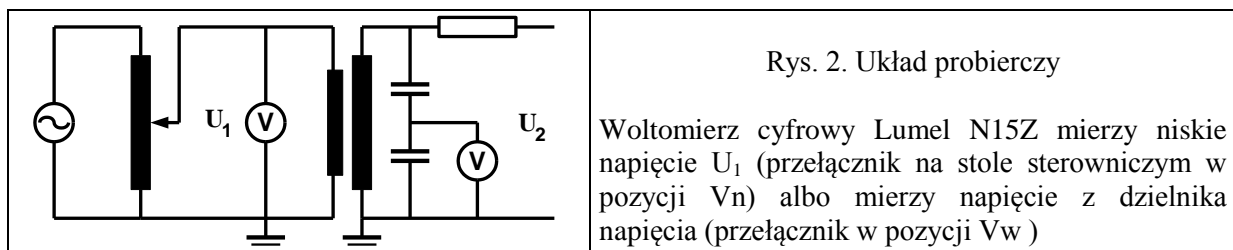
3. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonywane są na stanowisku pokazanym na rys. 1.



3. 3. Spis przyrządów

- Transformator probierczy TP 110, przekładnia napięciowa $\eta = 479$
- Rezystor tłumiący 500Ω
- Pojemnościowy dzielnik napięcia, przekładnia **311** (bez zwory), **822** (ze zworą)
- Woltomierz z wyświetlaczem cyfrowym Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1 \text{ digit}$
- Woltomierz elektrostatyczny typ C50, 75 V, 20 Hz – 10 MHz
- Woltomierz elektrostatyczny typ C50, 150 V, 20 Hz – 10 MHz
- Woltomierz elektromagnetyczny



3. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1. Zmierz napięcie przeskoku U_P modelu izolatora wsporczeo dla odległości elektrod 5, 10 and 15 cm. Napięcie powinno być mierzone za pomocą woltomierza elektrostatycznego dołączonego do dzielnika pojemnościowego

- Określ metodą optyczną napięcie początkowe jonizacji U_0 dla odległości elektrod 15 cm (zaciemnij wcześniej pomieszczenie).
- Oblicz napięcie przeskoku izolatora wsporczego dla tych samych odstępów korzystając z równań (1) i (2)
- Określ metodą optyczną w zaciemnionym pomieszczeniu napięcie początkowe jonizacji U_0 , napięcie początkowe wyładowań ślizgowych U_{sl} i napięcie przeskoku U_P izolatora przepustowego dla odległości elektrod 5, 10, 15 i 40 cm.
- Dla odległości elektrod izolatora przepustowego 10, 15 i 40 cm oblicz napięcia przeskoku U_P z równania (3). Przyjmij, że wartość stałej K w równaniu (3) wynosi 43.
- Wykonaj dwie lub trzy próby napięciowe z zabrudzonym izolatorem w celu zaobserwowania łuków częściowych i wymuszenia przeskoku zabrudzeniowego. Transformator probierczy TP110 należy połączyć do autotransformatora 70 kVA. Przy otwartym odłączniku należy ustalić określoną wartość napięcia a następnie szybko zamknąć odłącznik. Jeśli wystąpi przeskoczek, następną próbę należy przeprowadzić przy niższym napięciu. Jeśli przeskoczek nie wystąpi, to wówczas następną próbę należy przeprowadzić przy wyższym napięciu (procedura „góra-dół”).

3. 5. Informacje dodatkowe

Zależność napięcia przeskoku U_P (kV) izolatora wsporczego od odległości elektrod l można przedstawić w postaci następujących wzorów:

$$U_P = 3,35 \cdot l + 20 \quad \text{dla } l > 10 \text{ cm} \quad (1)$$

$$U_P = 7,3 \cdot l - 0,2 \cdot l^2 \quad \text{dla } l \leq 10 \text{ cm} \quad (2)$$

Napięcie przeskoku U_P izolatora przepustowego:

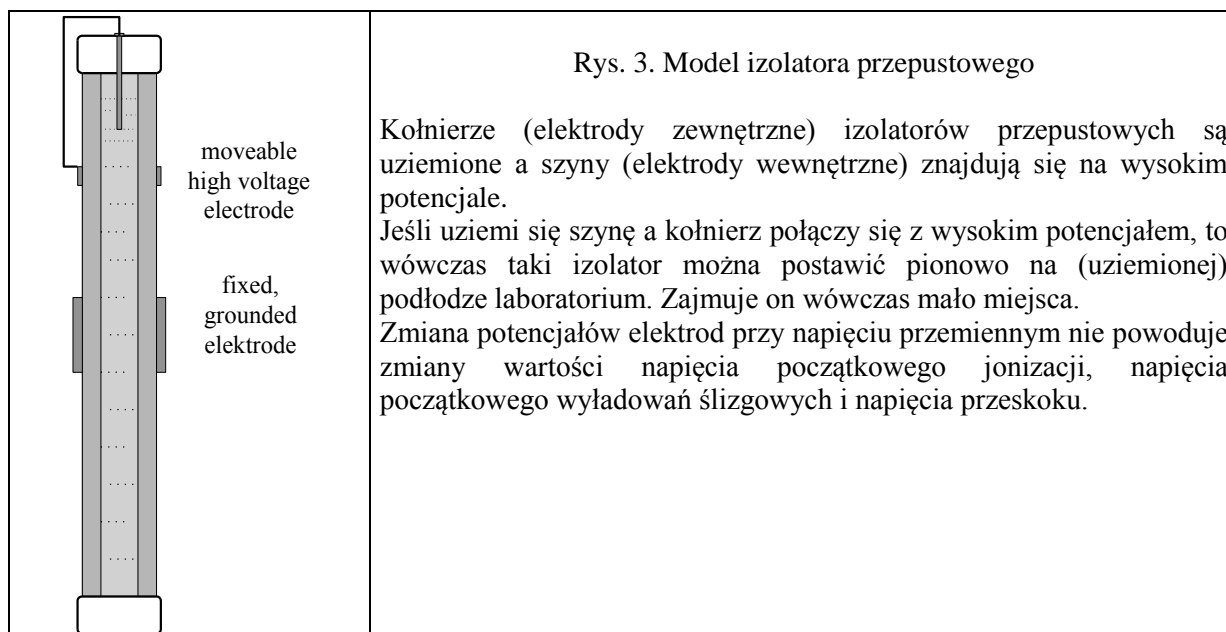
$$U_P = K \cdot l^{0,2} \cdot \left(\frac{R \cdot \ln \frac{R}{r}}{\epsilon_r} \right)^{0,4} \quad (3)$$

Dla modelu izolatora przepustowego o promieniu zewnętrznym $R = 7,5$ cm, promieniu wewnętrznym $r = 5$ cm, odległości elektrod l od 10 do 30 cm oraz pod napięciem przemiennym mierzonym w kV_{rms} wartość stałej $K = 43$.

Tabela 1. Parametry modeli izolatorów

Model	Wymiary (cm)	ϵ_r
Izolator wsporczy	$D = 15, d = 10$	7
Izolator przepustowy	$D = 15, d = 10$	7
Izolator liniowy LP 60/5U	$H = 26, L = 52, f = 3,0$	-

D – średnica zewnętrzna, d – średnica wewnętrzna, H = wysokość (odległość elektrod), L = długość drogi upływu, f – współczynnik kształtu



3. 6. Zawartość sprawozdania

Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego.

Spis przyrządów z ich danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi

Wyniki pomiarów oraz wyniki obliczeń, przykłady obliczeń, wnioski.

Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego.

Wykreśl na jednym rysunku zależność $U_p = f(l)$ wyznaczoną eksperymentalnie i z obliczeń dla izolatora wspanocznego.

Wykreśl podobny rysunek dla izolatora przepustowego z wynikami eksperymentalnymi dla odległości elektrod $l = 5, 10, 15$ i 40 cm i z wynikami obliczeń dla odległości $l = 10, 15$ i 40 cm.

3. 7. Pytania kontrolne

1. Wpływ przenikalności dielektrycznej materiału na napięcie przeskoku czystego izolatora wspanocznego.
2. Opisz mechanizm wyładowań powierzchniowych na:
 - izolatorze wspanocznym
 - izolatorze przepustowym
 - zabrudzonym izolatorze
3. Wymagania stawiane transformatorom probierczym w tym transformatorom do prób zabrudzeniowych.
4. Parametry izolatorów napowietrznych.
5. Metoda "górną – dół".

3. 8. Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wrocławska 1980, rozdz. 10, 17
- [2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 1.4.3; 2.4
- [3] Looms J.S.T., Insulators for High Voltages, Peter Peregrinus Ltd, 1990

ĆWICZENIE VI: WYTRZYMAŁOŚĆ POWIERZCHNIOWA

Data pomiarów:

1. Sprawozdawca

2. Student

3. Student

4. Student

5. Student

6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$, $p = \dots\dots\dots \text{hPa}$, $\text{RH} = \dots\dots\dots\%$

$\delta =$

Tabela 1. Napięcie przeskoku izolatora wsporczeo

Nr	l	U_1	$U_{1\text{śr}}$	$U_{2\text{PT}}$	$U_{2\text{PN}}$	Uwagi
	cm	V	V	kV	kV	
1	5					
2						
3						
1	10					
2						
3						
1	15					$U_o =$
2						$U_o =$
3						$U_o =$

U_1 - niskie napięcie nn

$U_{1\text{śr}}$ - wartość średnia nn (z trzech kolejnych prób)

$U_{2\text{PT}}$ - napięcie przebicia w rzeczywistych warunkach atmosferycznych, $U_{2\text{PT}} = U_{1\text{śr}} \cdot \eta$

$U_{2\text{PN}}$ - wysokie napięcie skorygowane do normalnych warunków atmosferycznych

η - przekładnia transformatora l - odległość elektrod

Tabela 2. Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych i napięcie przeskoku izolatora przepustowego

Nr	l	U_O	U_{Osr}	U_{Osr}	U_{sl}	$U_{sl\ sr}$	$U_{sl\ sr}$	U_P	U_{Psr}	U_{Psr}	U_{PN}
	cm	V	V	kV	V	V	kV	V	V	kV	kV
1	5										
2											
3											
1	10										
2											
3											
1	15										
2											
3											
1	40										
2											
3											

U_O – Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych

U_P – Napięcie przeskoku w rzeczywistych warunkach atmosferycznych

U_{PN} – Napięcie przeskoku w normalnych warunkach atmosferycznych (po korekcji wyników pomiarowych)

Uwaga: Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych U_O nie jest równe napięciu początkowemu jonizacji U_0 (gdy pojawi się słabe świecenie). Wyładowania ślizgowe są pomarańczowymi iskrami, który towarzyszą charakterystyczne trzaski. Światło jonizacji jest koloru fioletowego.

Przykład do wyznaczenia 50% napięcia przeskoku zabrudzeniowego metodą “góra-dół”

32	kV																				
30										F					F						
28								F		W		F		W		F				F	
26			F		F		W		W				W				F		W		
24		W		W		W												W			
22		W																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

W – bez przeskoku (withstand)

F – przeskok (flashover)

Zamodeluj wyniki pomiaru według metody “góra-dół” i oblicz 50% napięcie przeskoku.

	kV																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

ĆWICZENIE VII

POMIAR STRAT DIELEKTRYCZNYCH I WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

4. 1. Cel ćwiczenia

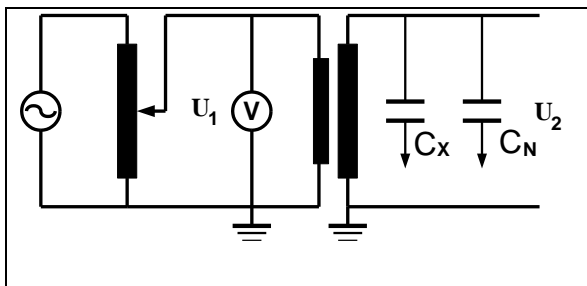
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie napięcia początkowego jonizacji za pomocą mostka Scheringa i miernika wyładowań niezupełnych. Należy wyznaczyć zależność współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$ i ładunku pozornego od napięcia.

4. 2. Układ probierczy



Rys. 1. Układ probierczy z mostkiem Scheringa i miernikiem wyładowań niezupełnych

- 1 – kabel elektroenergetyczny
- 2 – transformator
- 3 – kondensator
- 4 – wskaźnik zera
- 5 – mostek Scheringa
- 6 – miernik wyładowań niezupełnych



Rys. 2. Schemat układu probierczego

- C_X – Kabel elektroenergetyczny podłączony do mostka Scheringa lub do miernika wyładowań niezupełnych
- C_N – Kondensator wolny od wyładowań niezupełnych połączony z mostkiem Scheringa lub uziemiony

4. 3. Spis przyrządów


- Transformator probierczy TP 60 produkcji firmy ZWAR
- Niskie napięcie 220 V, 50 Hz, Wysokie napięcie 60 kV/30 kV
- Moc znamionowa 10/5 kVA Moc dorywcza (15 min) 20/10 kVA
- Znamionowy prąd wtórny 0,17 A Prąd wtórny dorywczy (15 min) 0,34 A
- Napięcie probiercze 50 Hz, 78 kV Kondensator wolny od wyładowań niezupełnych 500 pF \pm 1%, 50 kV, 50 Hz, Robinson Electronic Instruments, Manchester
- Woltomierz z wyświetlaczem cyfrowym Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1$ digit
- Woltomierz elektromagnetyczny

4. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1. Oszacuj pojemność kabla elektroenergetycznego korzystając z danych katalogowych (podanych w informacji dodatkowej)
Oszacuj maksymalny prąd płynący przez rezystancję mostka R_3 (gdy jest załączone największe dopuszczalne napięcie).
Oblicz największą dopuszczalną wartość napięcia niskiego (dane jest napięcie znamionowe kabla)
Połącz mostek Scheringa z układem probierczym.

2. Doprowadź mostek do równowagi dla różnych wartości napięcia. Oblicz wartości C_x i $\tan \delta_x$
3. Podłącz do układu miernik wyładowań niezupełnych korzystając z instrukcji
4. Przeprowadź kalibrację układu i wyznacz stałą kalibracji K
5. Określ napięcie początkowe wyładowań niezupełnych i zmierz maksymalny ładunek pozorny Q_x w zależności od napięcia zasilającego.
6. Zaobserwuj jak zmienia się obraz wyładowań niezupełnych na oscyloskopie.

4. 5. Informacje dodatkowe

	<p>Rys. 3. Zaciski niskiego napięcia transformatora TP60</p> <p>W tej pozycji zwory, przy napięciu $U_1 = 220 \text{ V}$ napięcie wysokie wyniesie 30 kV. Tabliczka nad zaciskami pokazuje dwa sposoby połączenia zacisków dla których napięcie znamionowe wynosi odpowiednio $U_2 = 30 \text{ kV}$ lub $U_2 = 60 \text{ kV}$</p>
---	--

Najwyższe napięcie probiercze musi być mniejsze od 11, 5 kV.

Przeprowadź pomiary za pomocą motka Scheringa i miernika wyładowań niezupełnych w zakresie 5 – 11,5 kV.

Parametry kabla elektroenergetycznego

Typ HAKFtA 3×150 , napięcie znamionowe $U_n = 20 \text{ kV}$ (międzyfazowe !)
 długość = 2 m, pojemność jednostkowa $0,3 \mu\text{F/km}$

4. 6. Zawartość sprawozdania

- Cel ćwiczenia, schemat układu probierczego
- Spis przyrządów z ich najważniejszymi danymi technicznymi i numerami ewidencyjnymi
- Tabele pomiarowe z wynikami obliczeń, przykłady obliczeń
- Protokół pomiarów podpisany przez prowadzącego
- Obliczenia szacujące wartość C_x , R_3 , największą wartość prądu płynącego przez rezystor R_3 .
- Narysuj następujące zależności: $\tan \delta_x = f(U)$ i $C_x = f(U)$ na jednym rysunku oraz
- $Q_x = f(U)$ i $P \text{ (W/km)} = f(U)$ na drugim rysunku,
- Określ napięcie początkowe jonizacji z zależności: $\tan \delta_x = f(U)$, $Q_x = f(U)$,
- Na podstawie powyższych zależności oceń stan techniczny badanego kabla (czy może on być włączony do eksploatacji w systemie elektroenergetycznym ?)

4. 7. Pytania kontrolne

1. Przyczyny strat dielektrycznych w izolacji elektrycznej
2. Typowa zależność $\tan \delta$ od napięcia
3. Wysokonapięciowy mostek Scheringa, odmiany (typy), warunki równowagi
4. Wyładowania niezupełne, ich rola w procesach starzeniowych
5. Model izolacji stałej ze szczeliną gazową, definicja współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$
6. Pomiary wyładowań niezupełnych, wyjaśnij termin “ładunek pozorny”
7. Jakie jest najwyższe dopuszczalne napięcie probiercze w tym ćwiczeniu ?
8. Straty energii w kablach elektroenergetycznych

4. 8. Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wroclawska 1980, rozdz. 18
- [2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 1; 5.3.5; 5.3.6
- [3] Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej 1999, rozdział 14, 15

INSTRUKCJA OBSŁUGI MIERNIKA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH MWN

Miernik wyładowań niezupełnych MWN (rys. 4) produkcji Zakładu Aparatury Naukowej i Dydaktycznej ZANID mierzy maksymalny ładunek pozorny Q i składa się z następujących części:

- oscyloskopu POS-302
- szerokopasmowego wzmacniacza WS-401
- standardowego generatora GW-201
- elektronicznego woltomierza WE-201
- miernika wartości szczytowej DWS-201.

Impedancja pomiarowa ZUW-1 (rys. 5) stanowi zewnętrzną część miernika wyładowań niezupełnych.

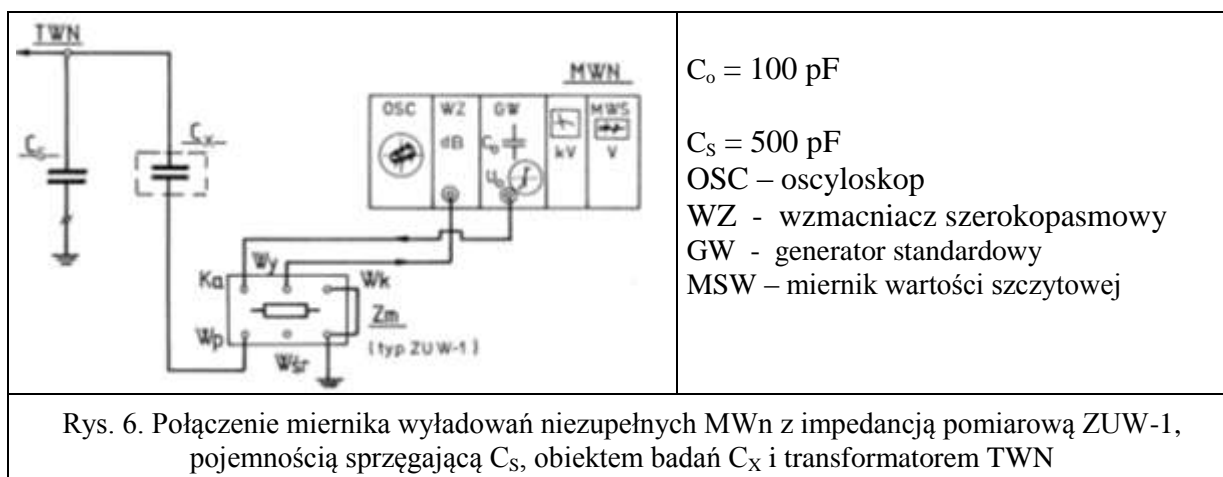


Rys. 4. Miernik wyładowań niezupełnych MWN



Rys. 5. Impedancja pomiarowa ZUW-1

Standardowy generator, połączony z kondensatorem C_o , wytwarza prostokątne impulsy o regulowanej amplitudzie napięcia U_o . Pojemność kondensatora C_o jest zazwyczaj wielokrotnie mniejsza niż pojemność badanego obiektu C_x (rys. 6). Na tym rysunku generator GW-201 jest połączony z impedancją pomiarową ZUW-1. Tego typu kalibracja nazywa się kalibracją pośrednią (rys. 6).



KALIBRACJA

Połącz obwód tak jak na rys. 6:

- połącz wejście wzmacniacza WZ z wyjściem impedancji ZUW-1 za pomocą kabla koncentrycznego,
- połącz wyjście standardowego generatora GW z wejściem impedancji pomiarowej ZUW-1 za pomocą kabla koncentrycznego zakończonego wtyczką BNC,
- połącz badany kabel elektroenergetyczny C_X z gniazdem BNC Wp (wejście początek) impedancji pomiarowej ZUW-1,
- połącz gniazdo BNC Wk (wejście koniec) i zacisk uziemienia impedancji ZUW-1 z potencjałem ziemi,
- połącz zacisk kondensatora sprzęgającego C_S z potencjałem ziemi.

Reaktancja kondensatora sprzęgającego C_S i obiektu badań C_X są pomijalnie małe dla sygnałów wyładowań niezupełnych ($C_S, C_X \gg C_o$). W takim wypadku ładunek w rozpatrywanym obwodzie zależy jedynie od wartości pojemności C_o i od napięcia U_o .

$$Q_o = U_o \cdot C_o \quad (1)$$

A zatem stała kalibracji obwodu jest ilorazem

$$K = \frac{Q_o}{\Delta U_{we}} \quad (2)$$

gdzie ΔU_{we} jest maksymalną wartością impulsu napięciowego zmierzonego przez miernik wartości szczytowej MWS podczas kalibracji układu.

Amplituda impulsów standardowego generatora zależy od pozycji przełącznika tłumienia i jest zestawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Amplituda napięcia U_o standardowego generatora

Tłumienie (dB)	20	40	60	80	100
Napięcie kalibrujące U_o (V)	10	1,0	0,1	0,01	0,001

Amplituda impulsów ΔU_{we} podczas kalibracji (i później podczas pomiaru wyładowań niezupełnych) może być obliczona ze wskazań miernika wartości szczytowej MWS i po znalezieniu odpowiedniej wartości zakresu napięciowego w tab. 2. Zakresy napięciowe odpowiadające 100 działkom na skali miernika MWS, podawane w (mV) zależą od ustawienia przełącznika wzmocnienia (dB) szerokopasmowego wzmacniacza WZ (tab. 2).

Tabela 2. Zakresy napięcia miernika wartości szczytowej MWS i odpowiadające im pozycje przełącznika wzmocnienia szerokopasmowego wzmacniacza WZ

Wzmocnienie dB	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
U_{we} (mV)	0,1	0,316	1,0	3,16	10	31,6	100	316	1000	3160

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA KALIBRACJI K

Ustaw przełączniki w następujące pozycje:

- faza standardowego generatora na pozycję 0 - 180°,
- tłumienie standardowego generatora na pozycję 20 dB,

- wzmocnienie szerokopasmowego wzmacniacza na pozycję 60 dB,
- ustaw wyłączniki sieciowe miernika wyładowań niezupełnych i standardowego generatora w pozycji (Zał).

Na ekranie oscyloskopu ukaże się z pewnym opóźnieniem elipsa z dwoma znacznikami.

Następnie dokonaj następujących czynności:

- odczytaj wychylenie wskazówki miernika wartości szczytowej MWS w działkach α ,
- odczytaj wartości U_o z tabeli 1 oraz U_{we} z tabeli 2,
- oblicz ładunek Q_o z równania (1) i stałą kalibracji K z równania (2).

POMIAR NAPIĘCIA POCZĄTKOWEGO WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH I ŁADUNKU POZORNEGO Q

- wyłącz standardowy generator GW,
- ustaw wzmocnienie szerokopasmowego wzmacniacza na 80 dB,
- włącz wysokie napięcie,
- podnoś wolno napięcie aż do pojawienia się pików na monitorze oscyloskopu. Odczytaj wartość napięcia początkowego wyładowań niezupełnych U_i na woltomierzu mierzącego napięcie na niskiej stronie transformatora,
- Ustaw wzmocnienie na pozycji przy której wychylenie wskazówki miernika MWS jest mniejsze od 100 działek,
- Oblicz wartość maksymalną ładunku pozornego Q ,
- Powtórz pomiar Q dla kilku wartości napięcia.

PRZYKŁAD OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA KALIBRACJI K

Dane są: tłumienie generatora standardowego = 20 dB \Rightarrow z tabeli 1: $U_o = 10$ V.

Pojemność $C_o = 100$ pF a $U_o = 10$ V $\Rightarrow Q_o = U_o \cdot C_o = 10 \cdot 100 = 1000$ pC.

Załóżmy, że wskazówka miernika wartości szczytowej MWS odchyła się do 75 działek, $\alpha = 75$

Jeśli wzmocnienie szerokopasmowego wzmacniacza = 60 dB \Rightarrow z tabeli 2, $\Delta U_{we} = 10$ mV (dla $\alpha = 100$ działek)

$$\text{Dla } \alpha = 75 \text{ działek } \Rightarrow \Delta U_{we} = 10 \text{ mV} \cdot \frac{75}{100} = 7,5 \text{ mV}$$

$$K = \frac{Q_o}{\Delta U_{we}} = \frac{1000}{7,5} = 133 \frac{\text{pC}}{\text{mV}}$$

PRZYKŁAD OBLICZANIA ŁADUNKU POZORNEGO Q

Miernik wartości szczytowej MWS wskazuje 90 działek, $\alpha = 90$ działek.

Wzmocnienie szerokopasmowego wzmacniacza = 80 dB \Rightarrow z tabeli 2, $\Delta U_{we} = 1$ mV (dla $\alpha = 100$ działek).

$$\text{Dla } \alpha = 90 \text{ działek } \Rightarrow \Delta U_{we} = 1 \text{ mV} \cdot \frac{90}{100} = 0,9 \text{ mV}$$

$$Q = K \cdot \Delta U_{we} = 133 \cdot 0,9 = 120 \text{ pC}$$

ĆWICZENIE VII: POMIAR STRAT DIELEKTRYCZNYCH I WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Tab. 1. Dobór elementów mostka Scheringa

długość badanego kabla elektroenergetycznego $l = 2$ m
pojemność jednostkowa badanego kabla $C_{jedn} = 0,3 \mu\text{F}/\text{km} = \dots\dots\dots\text{pF}/\text{m}$

C_X	R_4	R_3	C_N	U_2	η_{TR}	U_{Idop}	f	I_{obc}	I_{dop}
pF	Ω	Ω	pF	kV	-	V	Hz	mA	mA
	$1000 / \pi$		500	11,5					70

- C_X – oszacowana pojemność badanego odcinka kabla
 R_3 - wartość oszacowana z warunków równowagi wartość mostka (ze wzoru 1 na następnej stronie)
 U_{Idop} - największa dopuszczalna wartość niskiego napięcia odpowiadająca największemu dopuszczalnemu napięciu $U_2 = 11,5$ kV
 η_{TR} – wartość rzeczywista przekładni transformatora, f - częstotliwość napięcia zasilającego
 I_{obc} – oszacowana wartość maksymalna prądu płynąca przez mostek Scheringa
 I_{dop} – dopuszczalna wartość prądu mostka Scheringa przy przełączniku bocznika w pozycji „ ∞ ”

Tabela 2. Wyznaczenie zależności $C_X = f(U_2)$ oraz $\tan \delta = f(U_2)$

	U_1	U_2	R_3	C_4	$\tan \delta$	C_X	p	Uwagi
	V	kV	Ω	μF	-	pF	W/km	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8		11,5						

p – straty mocy na jednostkę długości kabla

U_j – napięcie początkowe jonizacji wyznaczone z zależności $\tan \delta = f(U_2)$

Tabela 3. Kalibracja układu do pomiaru wyładowań niezupełnych

C_0	U_0	Q_0	α	tłumienie	U_{100}	ΔU_{we}	K
pF	V	pC	działki	dB	mV	MV	pC / mV
100							

C_0 - pojemność kondensatora kalibrującego = 100 pF

U_0 - amplituda impulsu prostokątnego z generatora

Q_0 - Ładunek kalibrujący płynący przez pojemność badanego kabla C_x , ($Q_0 = C_0 \cdot U_0$)

α - wychylenie wskazówki miernika wartości szczytowej przy danym wzmacnieniu

U_{100} – zakres napięciowy przy danym wzmacnieniu odpowiadający 100 działkom na mierniku wartości szczytowej

ΔU_{we} – wartość szczytowa mierzona przez miernik wyładowań niezupełnych $\Delta U_{we} = U_{100} \frac{\alpha}{100}$

K - współczynnik kalibracji $K = \frac{Q_0}{\Delta U_{we}}$

Tabela 4. Wyznaczenie funkcji $Q_P = f(U_2)$

	U_1	U_2	α	Wzmocnienie	U_{100}	ΔU_{we}	K	Q_p	Uwagi
	V	kV	działki	dB	mV	mV	pC / mV	pC	
1									Uj = wyznaczone z $Q=f(U_2)$
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Q_p – ładunek pozorny

Wzoru do obliczenia C_x , $\tan \delta$ i mocy traconej w badanym odcinku kabla:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

$$\tan \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 \quad (2)$$

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \tan \delta \quad (3)$$

ĆWICZENIE VIII

ROZKŁAD NAPIĘCIA WZDŁUŻ IZOLATORÓW

8. 1. Cel ćwiczenia

Celem pomiarów jest wyznaczenie rozkładu napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kołpakowych i wzdłuż modelu izolatora wsporczeo oraz zbadanie wpływu pierścieni sterujących na rozkład napięcia.

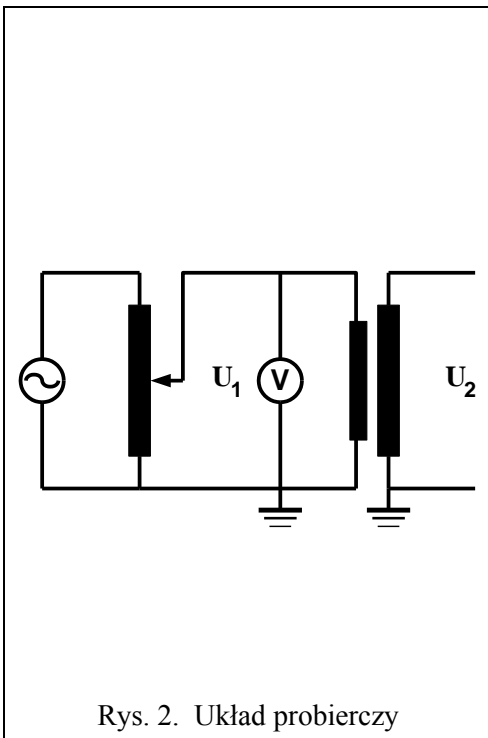
8. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonuje się na stanowisku pokazanym na rys. 1.

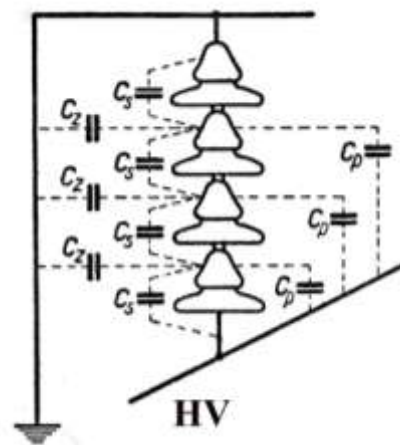


Rys. 1. Stanowisko z łańcuchem izolatorów kołpakowych i modelem izolatora wsporczeo

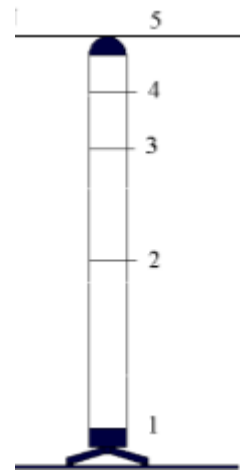
- 1 – łańcuch izolatorów kołpakowych
- 2 – model izolatora wsporczeo
- 3 – iskiernik kulowy
- 4 – transformator TP60
- 5 – dzielnik napięcia



Rys. 2. Układ pobierczy



a)



b)

Rys. 3. Obiekty badań

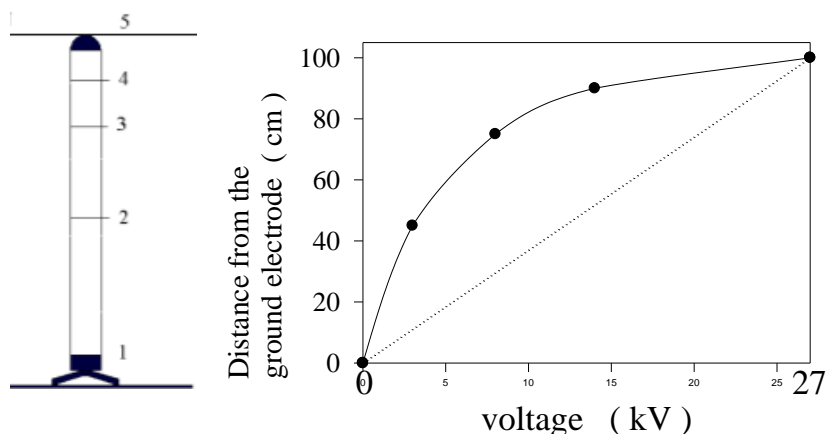
- a) Łańcuch 4 izolatorów kołpakowych z zaznaczonymi pojemnościami własnymi C_S i pojemnościami rozproszenia do ziemi C_Z i do przewodu fazowego C_P
- b) Model izolatora wsporczeo z elektrodami pomocniczymi

8.3. Spis przyrządów

- Transformator TP60, przekładnia napięciowa $\eta = 60\text{kV}/220\text{ V} = 273$
- Woltomierz cyfrowy Lumel N15Z, 300 V, $R > 2\text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1\text{ digit}$
- Woltomierz elektromagnetyczny
- Iskiernik kulowy o średnicy kul 10 mm

8.4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1	Zmierz napięcie na każdym z 5 izolatorów kołpakowych LK280/170 łańcucha za pomocą iskiernika kulowego o średnicy 10 mm. Podczas każdego pomiaru stosuj takie samo napięcie np. 27,2 kV ($U_1 = 100\text{ V}$): a) dołącz przewód fazowy bez pierścienia sterującego b) dołącz przewód fazowy z pierścieniem sterującym c) zamień środkowy izolator kołpakowy (o numerze 3) na izolator uszkodzony o numerze 3a i spróbuj zmierzyć napięcie na tym uszkodzonym izolatorze.
2	Opracowanie powyższych pomiarów a) sprawdź czy suma zmierzonych napięć ΔU jest równa wysokiemu napięciu U_2 przyłożonemu do całego łańcucha (porównaj napięcia szczytowe), b) oblicz współczynnik nierównomierności rozkładu napięcia „ k_N ” dla pomiarów wg punktów 1a i 1b (obliczenie współczynnika k_N wg wzoru (3) na str. 38) c) pokaż na jednym wykresie zależności $\Delta U = f(i)$, $i = 1 \dots 5$ dla zadań 1a i 1b
3	Ustal wysokie napięcie na 27,2 kV ($U_1 = 100\text{ V}$). Zmierz napięcie na odcinku 10 cm pomiędzy elektrodą wysokonapięciową i pierwszą elektrodą pomocniczą. Powtórz pomiar na niższym odcinku o długości 15 cm (pomiędzy elektrodami 4–3). Zwiększ wysokie napięcie do 54,4 kV ($U_1 = 200\text{ V}$) i zmierz napięcie na trzecim odcinku 30 cm (pomiędzy elektrodami pomocniczymi 3–2). Przelicz wyniki trzeciego pomiaru do wartości odpowiadającego wysokiemu napięciu 27,2 kV dzieląc wynik przez 2. Napięcie pomiędzy elektrodami 3–2 (rys. 3b) jest bardzo małe. Dlatego napięcie zasilające trzeba podwyższyć aby spowodować przebicie na iskierniku pomiarowym.
4	Wykreśl zmianę napięcia wzdłuż modelu izolatora wsporczego $U = f(x)$, podobnie do przykładu z rys. 4.



Rys. 4. Rozkład napięcia wzdłuż izolatora wsporczego

8. 5. Pytania kontrolne

1	Izolatory napowietrzne, typy, stosowane materiały
2	Budowa izolatorów kołpakowych
3	Elektryczny model łańcucha izolatorów kołpakowych
4	Pomiar wysokich napięć za pomocą iskiernika kulowego
5	Metody polepszenia rozkładu napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kołpakowych i wzdłuż izolatorów długopniowych

8. 6. Literatura

- [1] Juchniewicz J., Lisiecki J. (red) Wysokonapięciowe układy izolacyjne. Politechnika Wrocławska 1980, rozdz. 17
- [2] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 1; 5.3.5; 5.3.6
- [3] Al Dhalaan S.M., Elhirbawy M.A., Simulation of Voltage Distribution Calculation Methods Over a String of Suspension Insulators. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, Vol. 3, pp. 909 – 914
- [4] Chrzan K.L., Rebizant W., PSPICE application for modelling of cap and pin insulator strings. International Symposium Modern Electric Power Systems, MEPS, Wrocław 2002, pp. 581-585
- [5] Chrzan K.L., Gielniak J., Voltage distribution along metal oxide surge arresters. 13th International Symposium on High Voltage engineering ISH, Delft 2003, paper 077.

ĆWICZENIE VIII: ROZKŁAD NAPIĘCIA WZDŁUŻ IZOLATORÓW

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne $T = \dots\dots\dots^{\circ}\text{C}$, $p = \dots\dots\dots \text{hPa}$, $\text{RH} = \dots\dots\dots\%$ $\delta =$

Tab. 1. Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kołpakowych bez pierścienia sterującego

Lp	Nr izolatora	s	S_{sr}	ΔU_{sr}	ΔU_{PT}	ΔU	Uwagi
		mm	mm	kV_p	kV	%	
1	1	.....					-----
2		.....					-----
3		.....					-----
1	2	.....					-----
2		.....					-----
3		.....					-----
1	3	.....					-----
2		.....					-----
3		.....					-----
1	4	.....					-----
2		.....					-----
3		.....					-----
1	5	.....					-----
2		.....					-----
3		.....					-----

- s – zmierzona odległość kul iskiernika o średnicy 10 mm przy której wystąpiło przebicie
- ΔU_{sr} – napięcie przebicia odczytane z charakterystyki iskiernika (kV_p) dla normalnych warunków atmosferycznych
- ΔU_{PT} – napięcie przebicia iskiernika przeliczone na warunki atmosferyczne w jakich odbywał się pomiar i przeliczone na kV_{rms}
- ΔU – napięcie na danym izolatorze jako procentowa część napięcia przyłożonego do całego łańcucha

Tab. 2. Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów kołpakowych z pierścieniem sterującym

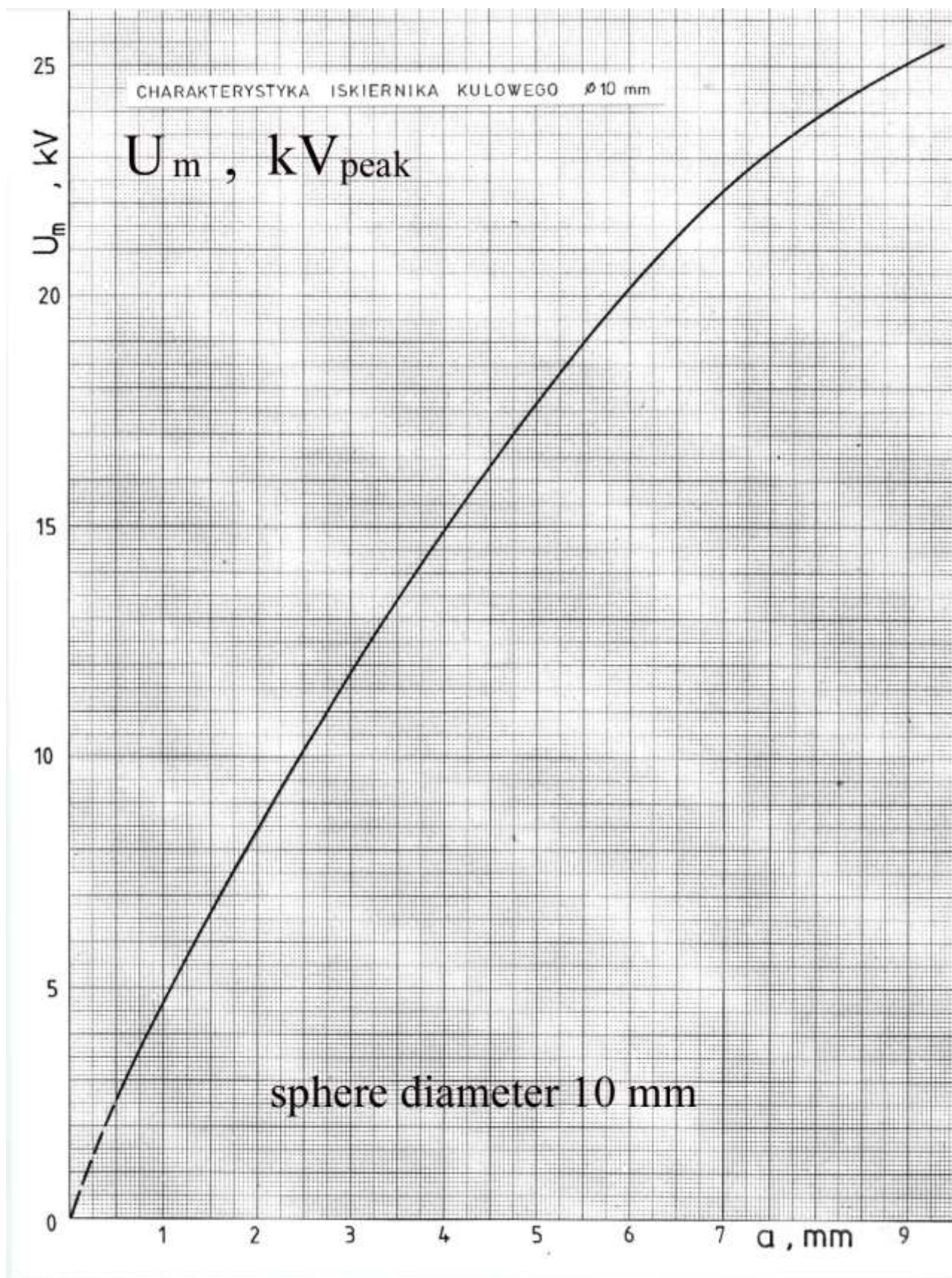
Lp	Nr izolatora	s	$S_{\dot{s}r}$	$\Delta U_{\dot{s}r}$	ΔU_{PT}	ΔU	Uwagi
		mm	mm	kV _p	kV	%	
1	1	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	2	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	3	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	4	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	5	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----

Pomiar napięcia na izolatorze o numerze 3a : $\Delta U = \dots\dots\dots$ kV

Tab. 3. Rozkład napięcia na modelu izolatora wsporczeo

	Pomiar pomiędzy elektrodami pokazanymi na rys. 3b na odcinkach o długości	s	$S_{\dot{s}r}$	$\Delta U_{\dot{s}r}$	ΔU_{PT}	ΔU	Uwagi
		mm	mm	kV _p	kV	%	
1	5-4 10 cm	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	4-3 15 cm	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
1	3-2 30 cm	-----					-----
2		-----					-----
3		-----					-----
	2-1 45 cm						Oblicz to napięcie jako różnicę: $\Delta U_{2-1} = \Delta U_{5-1} - \Delta U_{5-2}$

Charakterystyka iskiernika z kulami o średnicy 10 mm



ĆWICZENIE IX

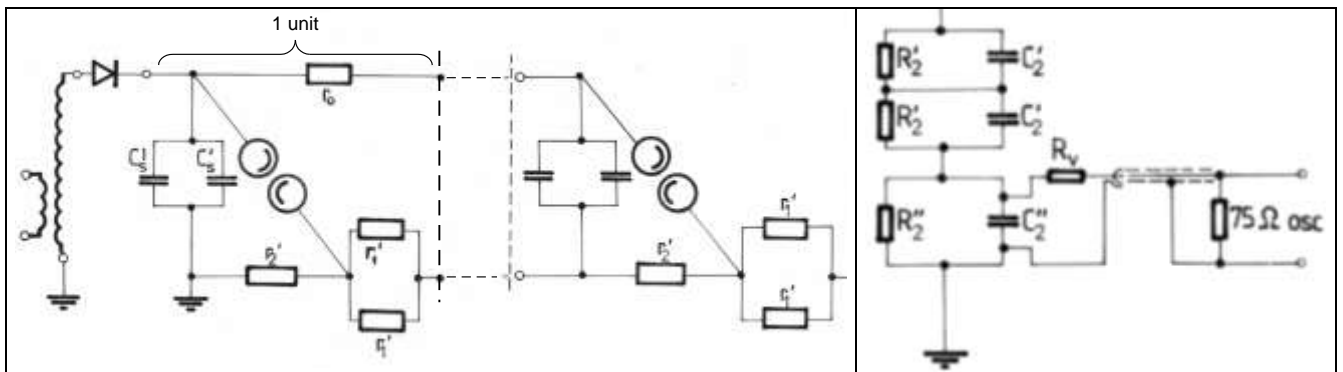
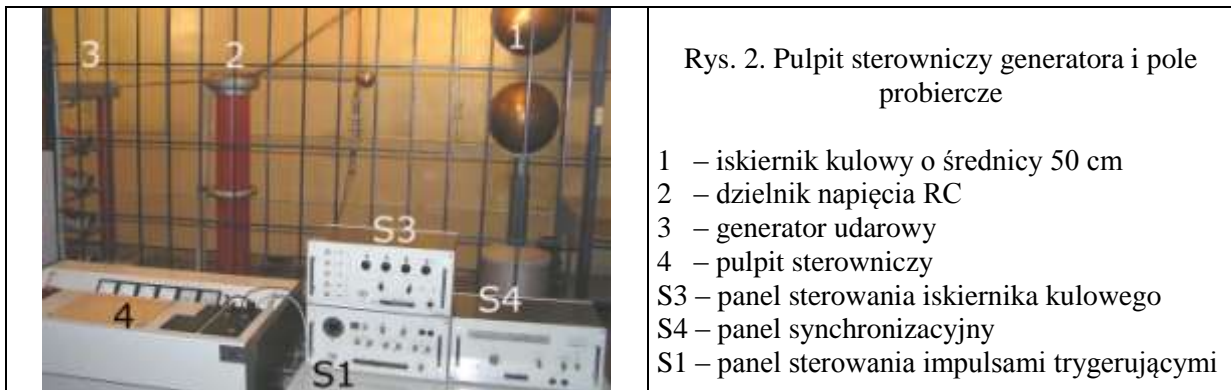
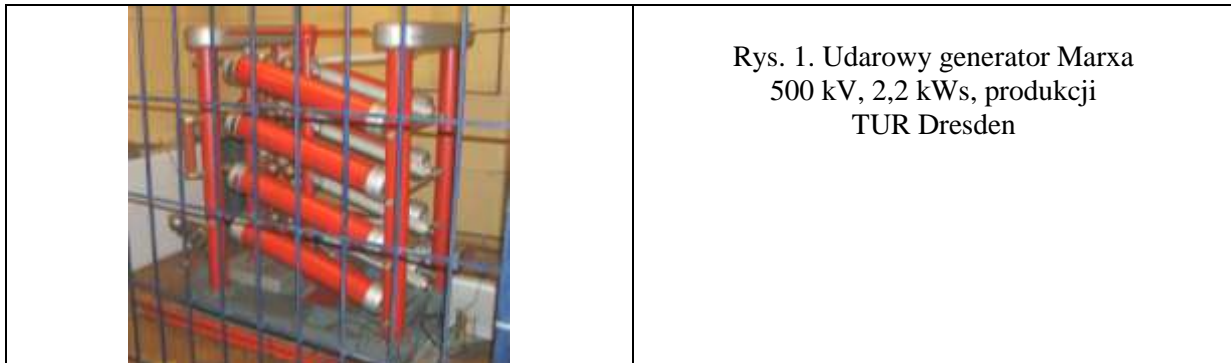
WYTWARZANIE UDARÓW NAPIĘCIOWYCH

5. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie udarowego napięcia przeskoku 20 kV izolatora kompozytowego wg metody serii oraz zapoznanie się z budową, działaniem i obsługą generatora udarowego Marxa.

5. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonywane są na stanowisku pokazanym na rys. 1 i rys. 2.



$C'_S = 0,035 \mu\text{F}$ $r'_1 = 122 \Omega$ $r_0 = 16,5 \text{ k}\Omega$ $r'_2 = 1360 \Omega$

Rys. 3. Schemat elektryczny 4- stopniowego generatora GU500

$C'_2 = 2966 \text{ pF}$ $R'_2 = 4026 \Omega$
 $C''_2 = 888 \text{ nF}$ $R''_2 = 36,8 \Omega$
 $r_v = 94 \Omega$

Rys. 4. Dzielnik napięcia RC

5.3. Spis przyrządów

- Pojemnościowo-rezystancyjny dzielnik napięcia typu SMCR 1500/500 TUR Dresden, przekładnia napięciowa **631**
- Precyzyjny woltomierz udarowy wartości szczytowej SV642 Haefely, zakresy pomiarowe: zakres mniejszy (LV), 16 V – 160 V, 1 MΩ
zakres większy (HV) 160 V – 1600 V, 2 MΩ

5.4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1. Zapoznaj się z budową 4-stopniowego generatora udarowego i z jego pulpitem sterowniczym.
2. Oszacuj parametry czasowe udarów T_1 i T_2 po obliczeniu zastępczych wartości pojemności i rezystancji schematu elektrycznego generatora.
Zastosuj następujące zależności: $T_1 \approx 2,5 \cdot R_1 \cdot C_2$ $T_2 \approx 0,7 \cdot R_{2E} \cdot C_1$
3. Wyznacz udarowe 50% napięcie przeskoku 20 kV izolatora kompozytowego według metody serii (przeprowadź próby napięciowe).
4. Z wyników prób napięciowych i korzystając z siatki Gaussa wyznacz:
 - 50% napięcie przeskoku – $U_{50\%}$
 - odchylenie standardowe – s
5. Oblicz napięcie wytrzymałwane U_W (napięcie przy którym prawdopodobieństwo przeskoku jest bardzo małe (mniejsze od 1%),
 - $U_W = U_{50\%} - 3 \cdot s$
6. Oblicz współczynnik udarowy izolatora kompozytowego przyjmując, że statyczne napięcie przeskoku (przy 50 Hz) wynosi kVrms.
7. Oblicz sprawność napięciową generatora Marxa mierząc stałe napięcie ładowania i amplitudę udaru.

5.5. Informacje dodatkowe

50% udarowe napięcie przeskoku $U_{50\%}$ jest równe amplitudzie serii udarów dołączanych do badanego obiektu (tzn. do izolatora kompozytowego) przy których prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku jest równe 0,5 (50%). $U_{50\%}$ jest wyznaczane metodą "serii" lub metodą "górze-dół".

Współczynnik udaru k_i :
$$k_i = \frac{U_{50\%}}{U_{AC \text{ peak}}}$$

gdzie tzw. statyczne napięcie przeskoku $U_{AC \text{ peak}}$ (mierzone w kV szczytowych) może być wyznaczone przy napięciu przemiennym 50 Hz lub przy napięciu stałym.

Charakterystyka udarowa jest zależnością udarowego napięcia przeskoku od czasu do przeskoku.

Sprawność napięciowa generatora η –
$$\eta = \frac{U_u}{U\tau} \cdot 100\%$$

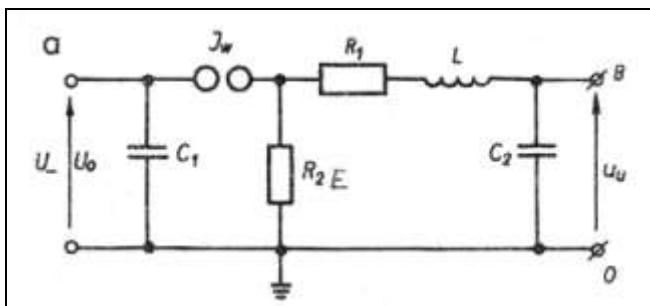
gdzie:

U_u - amplituda udaru piorunowego wytwarzanego przez generator,

U_1 – napięcie ładowania generatora udarowego. W przypadku generatorów wielostopniowych napięcie ładowania generatora jest napięciem ładowania jednego stopnia pomnożonego przez ilość stopni.

Transformacja 4-stopniowego generatora do generatora 1 – stopniowego

Poniżej przedstawiono uproszczoną procedurę obliczania parametrów 1 – stopniowego generatora który jest równoważny generatorowi 4 – stopniowemu Marxa produkcji TUR Dresden oraz obliczania czasów T_1 i T_2 .



Rys. 5. Jednostopniowy generator udarowy

$$C'_S = 0,035 \mu F \rightarrow C_1 = \frac{0,035 \times 2}{4} = 0,0175 \mu F$$

$$T_1 \approx 2,5 \cdot R_1 \cdot C_2$$

$$C'_2 = 2966 \text{ pF} \rightarrow C_2 = \frac{2966}{2} = 1483 \text{ pF}$$

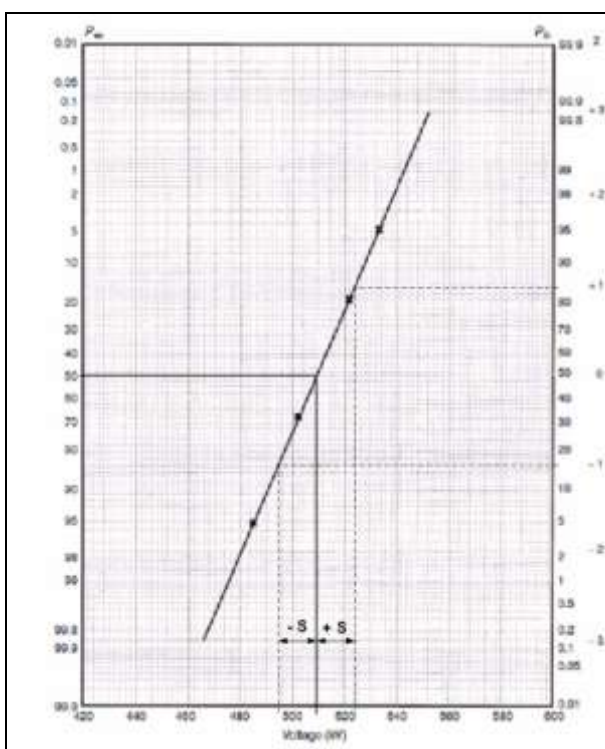
$$T_2 \approx 0,7 \cdot R_{2E} \cdot C_1$$

$$r'_1 = 122 \Omega \rightarrow R_1 = \frac{122 \times 4}{2} = 244 \Omega$$

$$r'_2 = 1360 \Omega \rightarrow r_2 = 4 \times 1360 = 5440 \Omega$$

$$R'_2 = 4026 \Omega \rightarrow R_2 = 2 \times 4026 = 8052 \Omega$$

r_2 i R_2 są połączone równolegle $\rightarrow R_{2E} = 3246 \Omega$



Rys. 6. Wyznaczenie $U_{50\%}$ i odchylenia standardowego S z siatki Gaussa

5. 5. Pytania kontrolne

1.	Parametry udarów piorunowych normalnych i udarów łączeniowych normalnych
2.	Zasada działania generatora udarowego Marxa
3.	Parametry elektryczne generatorów udarowych i ich związek z parametrami opisującymi kształt udarów
4.	Sprawność napięciowa generatorów udarowych
5.	Pomiar napięć udarowych za pomocą iskiernika kulowego, zalety i wady, błędy pomiarowe
6.	Dzielniki napięcia do pomiaru udarów napięciowych
7.	Woltomierz wartości szczytowej
8.	50% udarowe napięcie przeskoku, definicja, metody wyznaczania; napięcie wytrzymawane, 100% napięcie przeskoku
9.	Charakterystyka udarowa, metoda wyznaczania, zależność charakterystyki udarowej od rozkładu pola elektrycznego badanego obiektu
10.	Wyjaśnij termin czas opóźnienia przeskoku, omów jego znaczenie praktyczne

5. 6. Literatura

- [1] Flisowski Z., Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999, rozdział 5.1.3; 5.2.8; 5.3.3
- [2] Fleszyński J. (red.) Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1999, rozdział 3, 6, 9, 10
- [3] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes 2000, Chapter 2

ĆWICZENIE IX: WYTWARZANIE UDARÓW NAPIĘCIOWYCH

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$, $p = \dots\dots\dots\text{ hPa}$, $\text{RH} = \dots\dots\dots\%$ $\delta =$

1. Obliczanie czasu czosła T_1 i czasu do półszczytu T_2

$T_1 \approx 2,5 \cdot R_1 \cdot C_2 =$

$T_2 \approx 0,7 \cdot R_{2E} \cdot C_1 =$

2. Wyznaczanie napięcia przeskoku według metody serii

Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud udarów w próbach bez przeskoku $U =$ kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							
Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych $U_N =$ kV																				

Gdy przeskok wystąpi na czosle udaru, jego amplituda jest mniejsza od amplitudy udaru w próbie, w której przeskok nie wystąpił. Dlatego w obliczeniu średniej amplitudy w serii powinno uwzględniać się udary pełne

Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud udarów w próbach bez przeskoku $U =$ kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							
Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych $U_N =$ kV																				

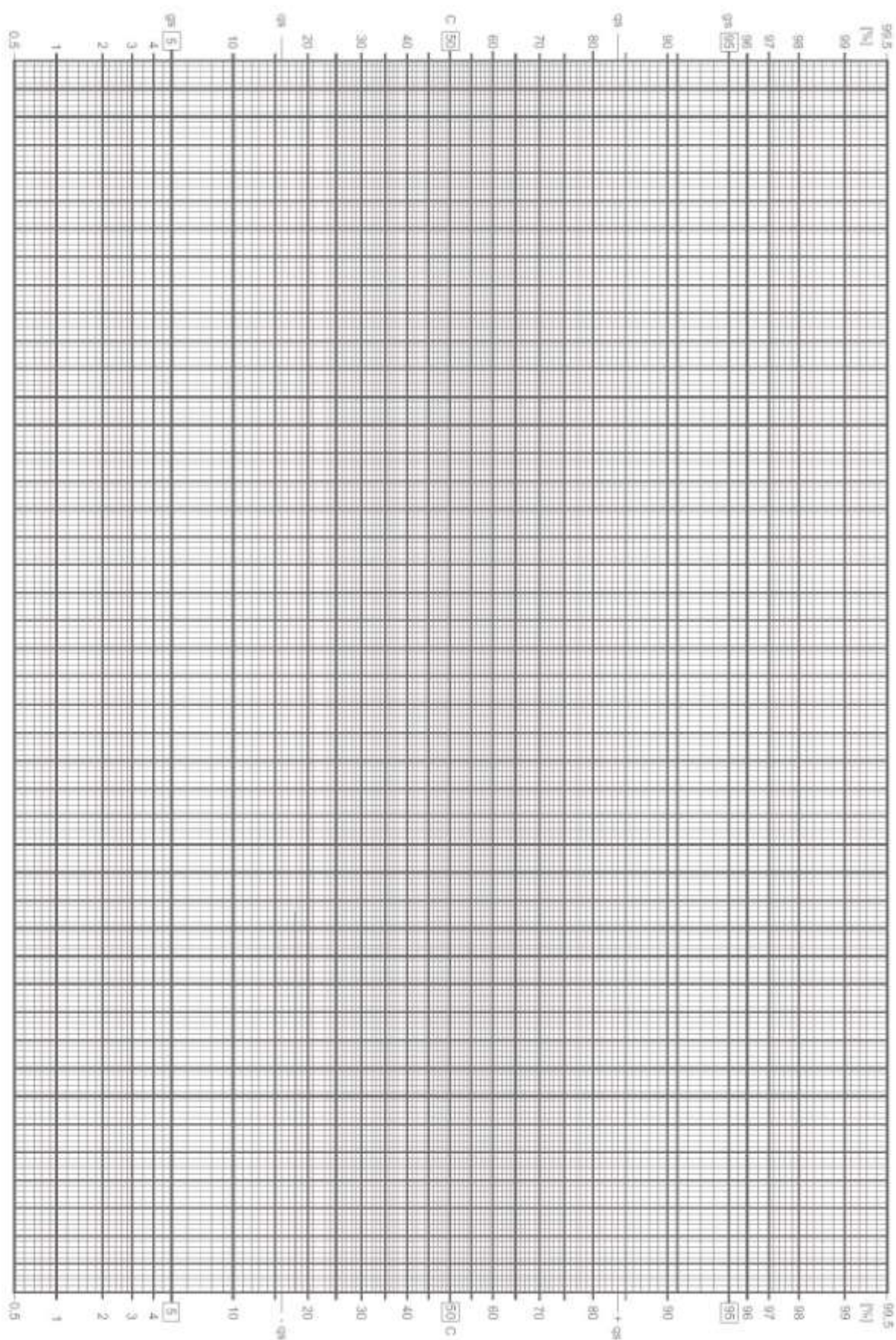
Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud uderzeń w próbach bez przeskoku U = kV Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych U _N = kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							

Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud uderzeń w próbach bez przeskoku U = kV Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych U _N = kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							

Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud uderzeń w próbach bez przeskoku U = kV Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych U _N = kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							

Napięcie ładowania jednego członu = kV										Odległość między kulami iskierników = mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV																			
F or W																				
Wartość średnia z amplitud uderzeń w próbach bez przeskoku U = kV Wartość skorygowana do warunków atmosferycznych normalnych U _N = kV													Prawdopodobieństwo przeskoku =							

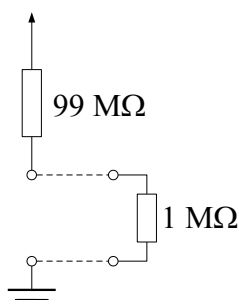
Siatka Gaussa do wyznaczenia 50% napięcia przeskoku i odchylenia standardowego



DODATEK

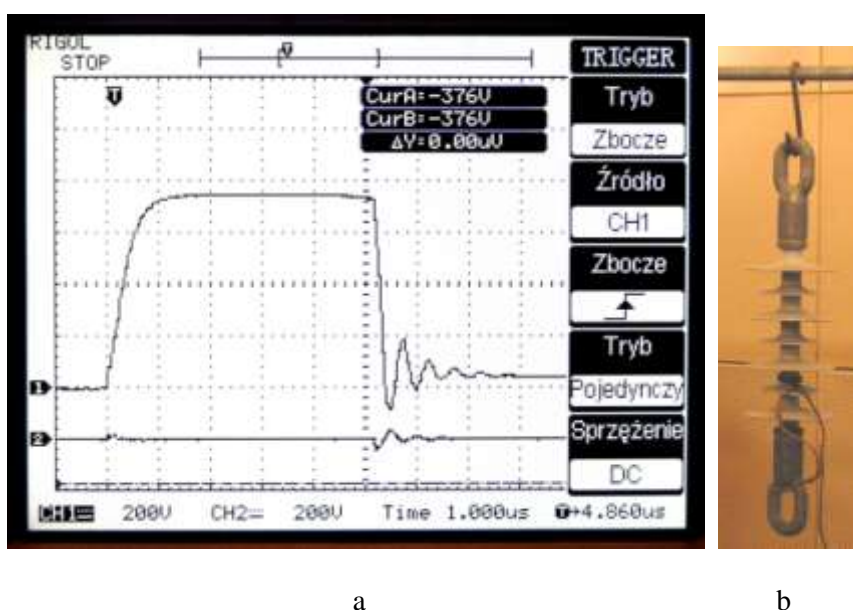
Oscylografowanie przebiegu napięcia z generatora GU 500 TUR Dresden

Przekładnia dzielnika pojemnościowo-rezystancyjnego SMCR 1500/500 jest zbyt mała aby można było połączyć go bezpośrednio ze standardowym oscyloskopem. Przy stałej 5 V/cm oscyloskopy mogą mierzyć sygnały o amplitudzie mniejszej od 40 V. Dostateczne zmniejszenie amplitudy napięcia z dzielnika SMCR 1500/500 umożliwia sonda oscyloskopowa TK – 250/100. Jest to rezystor 99 M Ω który wraz z rezystancją wejściową 1 M Ω oscyloskopu tworzy dzielnik napięciowy 100 : 1 (rys 1).



Rys. 1. Schemat elektryczny sondy oscyloskopowej TK – 250/100 połączonej z oscyloskopem.

Na rys. 2a pokazano oscylogram napięcia podczas przeskoku na izolatorze kompozytowym o skróconej drodze upływu (rys. 2b). Przed wykonaniem pomiaru w menu „CH1 – Sonda” należy wybrać opcję „100 X”. Przekładnia dwustopniowego dzielnika SMCR 1500/500 – sonda TK–250/100 wynosi około 260 V/V.



Rys. 2. Pomiar napięcia za pomocą dzielnika SMCR 1500/500 – sondy TK – 250/100 i oscyloskopu cyfrowego DS 5022 M firmy RIGOL Technologies.

Pomiar uzyskano przy następujących nastawach generatora udarowego: napięcie ładowania 60 kV (prąd mierzony na rezystancji 100 M Ω = 0,6 mA), odległość iskierników zapalających 21 mm. Amplituda udaru zmierzona dzielnikiem SMCR 1500/500 i woltomierzem wartości szczytowej Haefely SV 642 wynosiła 196 kV.

ĆWICZENIE X

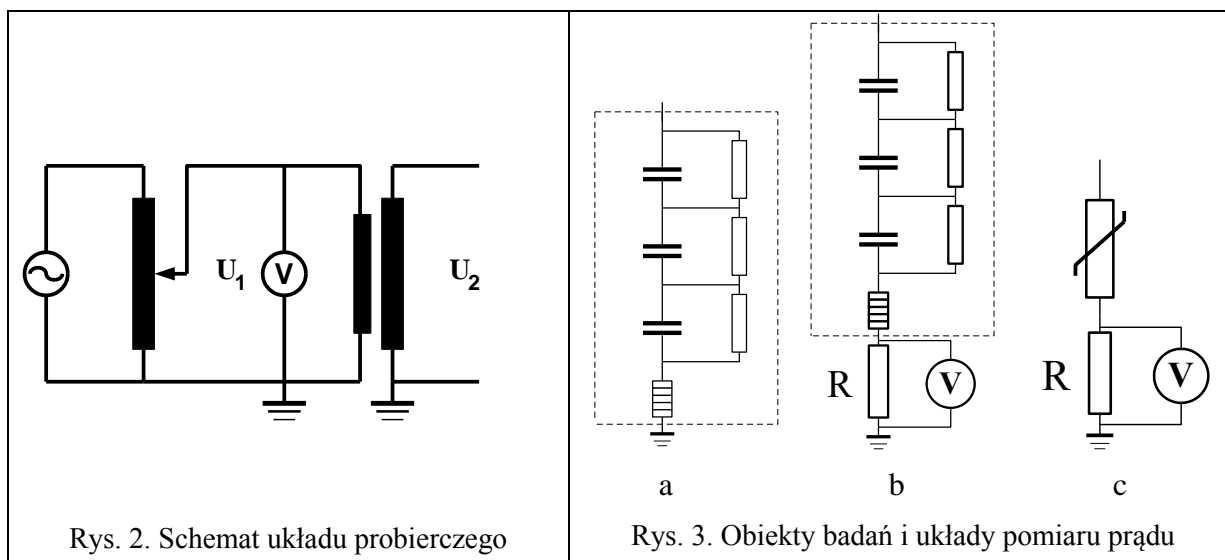
DIAGNOSTYKA OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

9. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest kontrola stanu technicznego ogranicznika iskiernikowego z warystorami karborundowymi oraz ogranicznika beziskiernikowego z warystorami na bazie tlenku cynku.

9. 2. Układ pomiarowy

Pomiary wykonywane są na stanowisku pokazanym na rys. 1.





9. 3. Spis przyrządów i obiektów badań

- Transformator TP100, przekładnia napięciowa $\eta = 470$
- Woltomierz cyfrowy Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1 \text{ digit}$

- Cyfrowy miernik uniwersalny 4150 PeakTech, AC 200 mV – 750 V
- Rezystancja dekadowa DR 4c – 16 INCO Pyskowice
- Oscyloskop cyfrowy
- Sonda oscyloskopowa model HC-OP20 produkcji Hung Chang Products Co., LTD
- Ogranicznik iskiernikowy GZSc 30/5 In = 5 kA produkcji ZWAR, najwyższe napięcie trwałej pracy $U_c = 30$ kV (międzyfazowe)
- Ogranicznik beziskiernikowy POLIM-D In = 10 kA produkcji ABB, U_c **nieznane**

9. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1	<p>Zmierz napięcie zapłonu iskierników. Podłącz ogranicznik iskiernikowy do układu probierczego (rys. 3a), pamiętaj o uziemieniu. Podnieś napięcie aż do zapłonu. Powtórz procedurę 6 razy i oblicz wartość średnią $U_{50\%}$ i odchylenie standardowe S. najwyższe napięcie trwałej pracy $U_c = 30$ kV, Jaki jest stosunek napięcia zapłonu $U_{50\%}$ do napięcia U_c ? Czy jest spełniony poniższy warunek ? $1,7 \cdot U_c < U_{50\%} < 2,8 \cdot U_c$</p>
2	<p>Wyznaczenie charakterystyki napięciowo-prądowej rezystorów sterujących. Podłącz ogranicznik iskiernikowy do układu probierczego (rys. 3b). Nastaw wartość 1000 Ω na rezystancji dekadowej. Zmierz prąd dla kilku wartości napięcia. Uwaga ! Aby nie dopuścić do zapłonu iskierników, napięcie musi być mniejsze od 0,8 $U_{50\%}$. Wykreśl funkcję $U_2 = f(I)$</p>
3	<p>Wyznaczenie charakterystyki napięciowo-prądowej ogranicznika beziskiernikowego. Podłącz ogranicznik beziskiernikowy do układu probierczego (rys. 3c). Podnieś napięcie po stronie niskiej transformatora do wartości najwyższej 80 V i wyznacz prąd. Następnie zmniejszając napięcie wyznacz prąd dla kilku punktów charakterystyki. Wykonaj jeden pomiar dla $U_1 = 75$ V. Wykreśl funkcję $U_2 = f(I)$ - Najwyższe napięcie trwałej pracy U_c nie jest znane. U_c powinno być równe około 70% napięcia znamionowego U_r (nie mylić U_r z napięciem roboczym). Wartość U_r jest usytuowana w pobliżu punktu zagięcia na charakterystyce napięciowo prądowej. Postaraj się określić napięcie U_c dla badanego ogranicznika..</p>
4	<p>Podłącz oscyloskop do bocznika prądowego. Dla dwóch wartości niskiego napięcia $U_1 = 50$ V i $U_1 = 75$ V wyznacz amplitudę prądu i porównaj z wynikiem z zadania 3. Wyjaśnij różnicę wyników.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="295 1534 774 1780">  <p style="text-align: center;">$U_2 = 50$ V</p> <p style="text-align: center;">Rys. 4. Prawie sinusoidalny kształt prądu</p> </div> <div data-bbox="885 1534 1364 1780">  <p style="text-align: center;">$U_1 = 75$ V</p> <p style="text-align: center;">Rys. 5. Prąd odkształcony</p> </div> </div>
<p>Zastosuj poniższe zakresy na oscyloskopie Kanał prądowy: $R = 1000 \Omega$, 50 mV/unit, 5 ms/cm Kanał napięciowy: dzielnik napięcia + sonda oscyloskopowa HC-OP20, attenuation 10:1, 5 V/unit</p>	

9. 5. Informacje dodatkowe

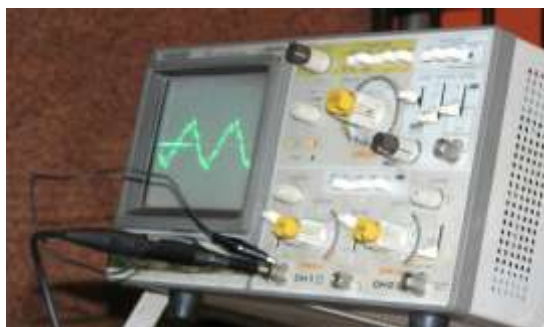
Sonda oscyloskopowa, oscilloscope probe model HC-OP20 manufactured by Hung Chang Products Co., LTD.

It is a passive, low-impedance attenuation probe. The probe has been designed and calibrated for use on instruments having an input impedance of $1\text{ M}\Omega$ paralleled by 20 pF .

The probe incorporates a 3 - position (1X, REF, 10X) slide switch in the head, compensating network and a cable length of 1,4 meters.

Tab. 1. Parametry elektryczne sondy HC-OP20

Characteristic	Performance requirements	
Oscilloscope input capacity	15 pF – 40 pF	
Attenuation	1:1	10:1
Input capacity	$72\text{ pF} \pm 10\%$	$17\text{ pF} \pm 2\text{ pF}$
Internal resistance	$237\ \Omega \pm 10\%$	$9\text{ M}\Omega \pm 1\%$
Band width	$15\text{ MHz} (\pm 3\text{ dB})$	$60\text{ MHz} (\pm 3\text{ dB})$
Max input voltage	500 V (AC p-p or 300 V (DC + AC p-p	



Rys. 6. Sposób podłączenia sondy HC-OP20 do oscyloskopu

9. 6. Pytania kontrolne

1	Z jakiego materiału były wytwarzane warystory stosowane w starych ogranicznikach iskiernikowych ?
2	Jaki materiał stosuje się w warystorach ograniczników beziskiernikowych ?
3	Dlaczego stare ograniczniki mają iskierniki ? Dlaczego nowe ograniczniki mogą nie mieć iskierników ?
4	Czy trzeba skorygować zmierzone napięcie zapłonu iskierników ogranicznika do warunków normalnych ?
5	Zalety rozwiązania beziskiernikowego dla poziomu ochrony.
6	Dlaczego osłona porcelanowa ograniczników jest potencjalnie niebezpieczna ?
7	Wyjaśnij termin “rozbieganie termiczne” (thermal run away).
8	Nazwij i zdefiniuj dwa najważniejsze parametry ograniczników oznaczane jako U_r oraz U_c .

9. 7. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.
- [2] Haddad A., Warne D.F. (editors), Advances in High Voltage Engineering, The Institution of Electrical Engineers IEE, 2004, Chapter 5, ZnO surge arresters.

ĆWICZENIE X: DIAGNOSTYKA OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Tab. 1. Pomiar napięcia zapłonu ogranicznika iskiernikowego GZSc 30/5

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	U ₁ średnie	U ₂ średnie	Odchylenie standardowe
												V	kV	%
U ₁	V													

Tab. 2. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej rezystorów sterujących ogranicznika iskiernikowego

		1	2	3	4	5	6	7
U ₁	V							
U ₂	kV							
U _{bocznika}	V							
I	μA							

Tab. 3. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej ogranicznika beziskiernikowego POLIM-D

		1	2	3	4	5	6	7
U ₁	V				50		75	80
U ₂	kV							
U _{bocznika}	V							
I	μA							

Zadanie 4. Pomiar prądu za pomocą oscyloskopu dla dwóch punktów charakterystyki

U_1	V	50	75
U_2	kV		
U_{bocznika}	V		
I	$\mu\text{A}_{\text{peak}}$		

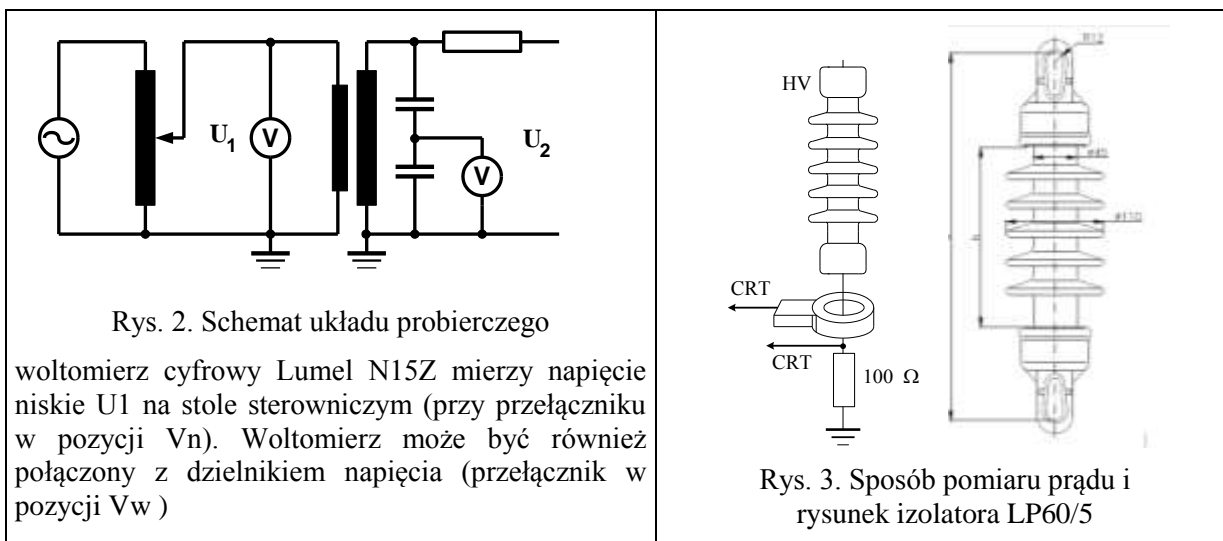
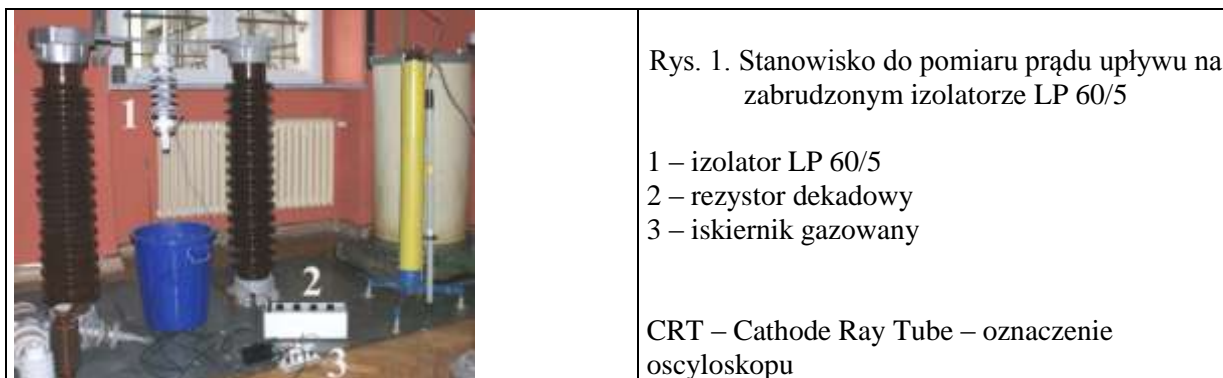
ĆWICZENIE XI

PRĄD UPŁYWU NA ZABRUDZONYM IZOLATORZE

10. 1. Cel ćwiczenia

Celem pomiarów jest pomiar prądu upływu na zabrudzonym izolatorze pniowym i obliczenie napięcia przeskoku zabrudzeniowego.

10. 2. Układ pomiarowy



10. 3. Spis przyrządów i obiektów badań

- Transformator TP110, przekładnia napięciowa $\eta = 479$
- Rezystor tłumiący 500Ω
- Pojemnościowy dzielnik napięcia, przekładnia **311** (bez załączonej zwory), przekładnia **822** (z załączoną zworą)
- Woltomierz cyfrowy Lumel N15Z, 300 V, $R > 2 \text{ M}\Omega$, błąd $0,5\% \pm 1 \text{ digit}$
- Woltomierz elektrostatyczny typ C50, 75 V, 20 Hz – 10 MHz
- Woltomierz elektrostatyczny typ C50, 150 V, 20 Hz – 10 MHz
- Woltomierz elektromagnetyczny
- Sonda prądowa KYROYTSU model 8112 range 200 mA, 1 mA/mV
- Rezystancja dekadowa, najlepiej ustawić na $R = 100 \Omega$
- Sonda oscyloskopowa model HC-OP20, attenuation 10:1 (patrz opis w informacji dodatkowej w ćwiczeni nr 9)
- Oscyloskop Kikusui DSS 5040

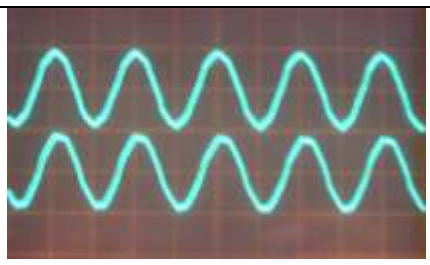
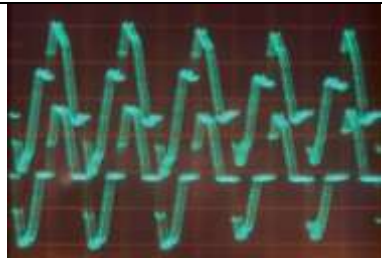
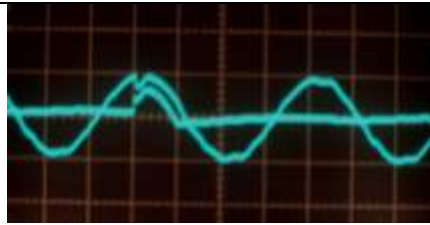
Tabela 1. Dane techniczne izolatora porcelanowego LP 60/5

Liczba kloszy	5	Droga upływu	52 cm
Średnica kloszy	135 mm	Współczynnik kształtu	2,1
Średnica pnia	60 mm	Powierzchnia	1510 cm ²

10. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

Wykonaj 3 próby napięciowe zabrudzonego izolatora mierząc prąd upływu za pomocą bocznika prądowego i / lub sondy prądowej. Transformator probierczy TP110 należy wcześniej połączyć z zewnętrznym autotransformatorem 70 kVA. Przy otwartym pomocniczym odłączniku nastaw napięcie na wybraną wartość a następnie szybko zamknij odłącznik. Należy nie dopuścić do wystąpienia przeskoku.

Poniżej podano przykładowe wyniki 3 prób z wartościami napięć probierczych, nastawami oscyloskopu oraz innymi istotnymi danymi.

Zad. 1. Pomiar prądu za pomocą bocznika prądowego oraz sondy prądowej na równomiernej warstwie zabrudzeniowej (bez stref suchych i palących się luków)			
	Kanał górny oscyloskopu Sonda prądowa	20 mV / cm	17 mA _{peak}
	Kanał dolny oscyloskopu Bocznik prądowy o rezystancji R = 100 Ω	2 V / cm	17 mA _{peak}
		U ₂ = 20 kVrms	
Zad 2. Prąd po zapłonie luków			
	Kanał górny oscyloskopu Sonda prądowa	10 mV / cm	20 mA _{peak}
	Kanał dolny oscyloskopu Bocznik prądowy o rezystancji R = 100 Ω	1 V / cm	20 mA _{peak}
		U = 35 kVrms	
Zad 3. Napięcie i prąd palącego się luku. Zapłon luku powoduje zapad napięcia.			
	Kanał 1 Sonda prądowa	50 mV / cm	25 mA _{peak}
	Kanał 2 Dzielnik napięcia o przekładni 857 (załączona zwora) + sonda oscyloskopowa HC-OP20, przekładnia 10:1	2 V / cm	
		U = 30 kVrms	

Zad 4. Oblicz napięcie przeskoku izolatora LP60/5 dla największej zmierzonej wartości prądu upływu I_h przy wartości napięcia U wykorzystując wzór (3) a następnie wzór (4) oraz wartości współczynników wydrukowanych tłustym drukiem na niżej załączonej informacji dodatkowej.

10. 5. Informacje dodatkowe



Rys. 4. Sonda prądowa KYROYTSU model 8112, zakresy prądowe 200 mA/ 2 A/ 20 A, 40 Hz – 10 kHz, w zakresie do 200 mA, stała pomiarowa wynosi 1 mA/mV

1. Obliczenie konduktywności powierzchniowej κ_s z wartości prądu upływu i zmierzonego wcześniej w zadaniu 1.

$$U = 20 \cdot 1,41 = 28 \text{ kV}_{\text{peak}}$$

$$\kappa_s = f / R = 2,1 \cdot 17 \text{ mA}_{\text{peak}} / 28 \text{ kV}_{\text{peak}} = 1,3 \text{ } \mu\text{S} \quad \text{gdzie: } f \text{ jest współczynnikiem kształtu izolatora}$$

2. Oblicz napięcie przeskoku z danej wartości prądu upływu.

Zastępcza średnica izolatora D_e jest średnicą cylindrycznego izolatora mającego taką samą drogę upływu L (cm) i taką samą rezystancję po zabrudzeniu warstwą o takiej samej konduktywności powierzchniowej jak izolator z kłozami.

$$D_e = \frac{L}{\pi \cdot f} \quad (1)$$

f - współczynnik kształtu izolatora

K - współczynnik uwzględniający koncentrację prądu w stopie łuku

$$K = \frac{R_{pa}}{R_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \kappa_s} \left(\frac{\log \frac{2 \cdot L_U}{\pi \cdot r} - \log \tan \frac{\pi \cdot X_{CU}}{2 \cdot L_U}}{L_U - X_{CU}} \right) = 0,46 \quad (2)$$

R_{pa} - rezystancja warstwy zabrudzeniowej uwzględniająca koncentrację prądu w stopie łuku w $k\Omega$

R_p - rezystancja warstwy zabrudzeniowej pomiędzy szerokimi elektrodami (bez palącego się łuku) w $k\Omega$

L_U - droga upływu podziałki kłozowej w cm

X_{CU} - krytyczna długość łuku dla jednej podziałki kłozowej w cm

r - promień łuku w cm, przyjęto wartość promienia łuku równą 0,2 cm

κ_s - konduktywność powierzchniowa w μS

D_s - średnica kłozy w cm, $D_s = 11 \text{ cm}$

L - droga upływu całego izolatora w cm, $L = 52 \text{ cm}$

X_c - krytyczna długość łuku na izolatorze w cm, $X_c = 0,6 \cdot L = 31 \text{ cm}$

Krytyczne napięcie U_C podzielone przez długość drogi upływu L można obliczyć z poniższego wzoru:

$$E_C = \left(\frac{D_s}{D_e} \right)^{\frac{1}{n-1}} \left[\frac{X_C}{L} \cdot \frac{D_e}{D_s} + K \cdot \frac{L - X_C}{L} \right] \cdot \left(\frac{U}{2L} \right)^{\frac{n}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot I_h^{\frac{-n}{n+1}} \quad (3)$$

$$E_C \text{ (kV}_{peak} / \text{cm)} = \frac{U_C}{L} \quad \Rightarrow \quad U_C = E_C \cdot L \quad (4)$$

U - napięcie w kV_{peak}

I_h - najwyższa wartość prądu podczas próby w A_{peak}

Uwaga ! napięcie mierzono w kV_{rms} .

Uwaga ! Prąd był mierzony w mA_{peak} .

$A = 400$, $n = 0,33$ - parametry łuku

Obliczenie współczynnika kształtu f

Współczynnik kształtu izolatora opisuje wzór:

$$f = \int_0^L \frac{1}{2\pi \cdot r(x)} dx \quad (5)$$

gdzie:

L - droga upływu,

x - droga mierzona wzdłuż obrotowej osi symetrii izolatora

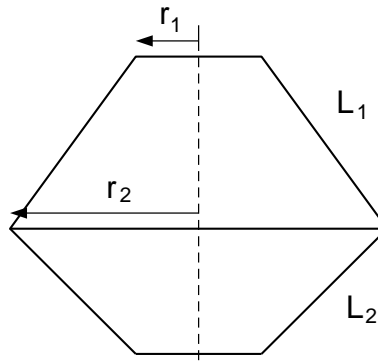
$r(x)$ - promień wzdłuż linii x

Przybliżone wyliczenie całki z równania (5) można dokonać przez pomiar promienia w różnych punktach wzdłuż drogi upływu, na wyrysowanym przekroju izolatora, np. takim jak na rys.6. Następnie te dane wykorzystuje się do obliczenia pola powierzchni (całki) jako sumy n iloczynów.

Inny, jeszcze bardziej uproszczony sposób obliczenia współczynnika kształtu izolatora kołpakowego zaproponował Jacobus Holtzhausen [3]. Procedura ta może być również adoptowana do obliczenia współczynnika kształtu izolatorów pniowych. Izolatory te mają cylindryczny pień i klosze. Współczynnik kształtu f_s pnia o wysokości h i o promieniu r :

$$f_s = \frac{h}{2\pi \cdot r} \quad (6)$$

Zgodnie z metodą Holtzhausena powierzchnia klosza złożona jest z dwóch ściętych stożków mających taką samą promień r_2 , równy promieniowi klosza (rys. 5). Górny stożek ma długość ściany L_1 , równą długości drogi upływu górnej części klosza. I podobnie, dolny stożek ścięty reprezentuje dolną część klosza mającą długość drogi upływu L_2 . Promień r_1 jest równy promieniowi pnia.



Rys. 5. Model klosza jako dwa ścięte stożki

Można wykazać, że współczynnik kształtu górnego ściętego stożka można obliczyć ze wzoru:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi(r_2 - r_1)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

Współczynnik kształtu całego klosza jest sumą współczynników kształtu górnej i dolnej części

$$f_K = f_1 + f_2 = \frac{L_1 + L_2}{2\pi \cdot (r_2 - r_1)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (8)$$

Izolator LP 45/5 ma 5 pni o takiej samej wysokości 2 cm (mających taki sam współczynnik kształtu f_{P2}), dolny pień o wysokości 4 cm (współczynnik f_{P4}) oraz 5 jednakowych kloszy o takim samym współczynniku kształtu f_K . Zatem współczynnik kształtu całego izolatora LP 45/5 jest następującą sumą:

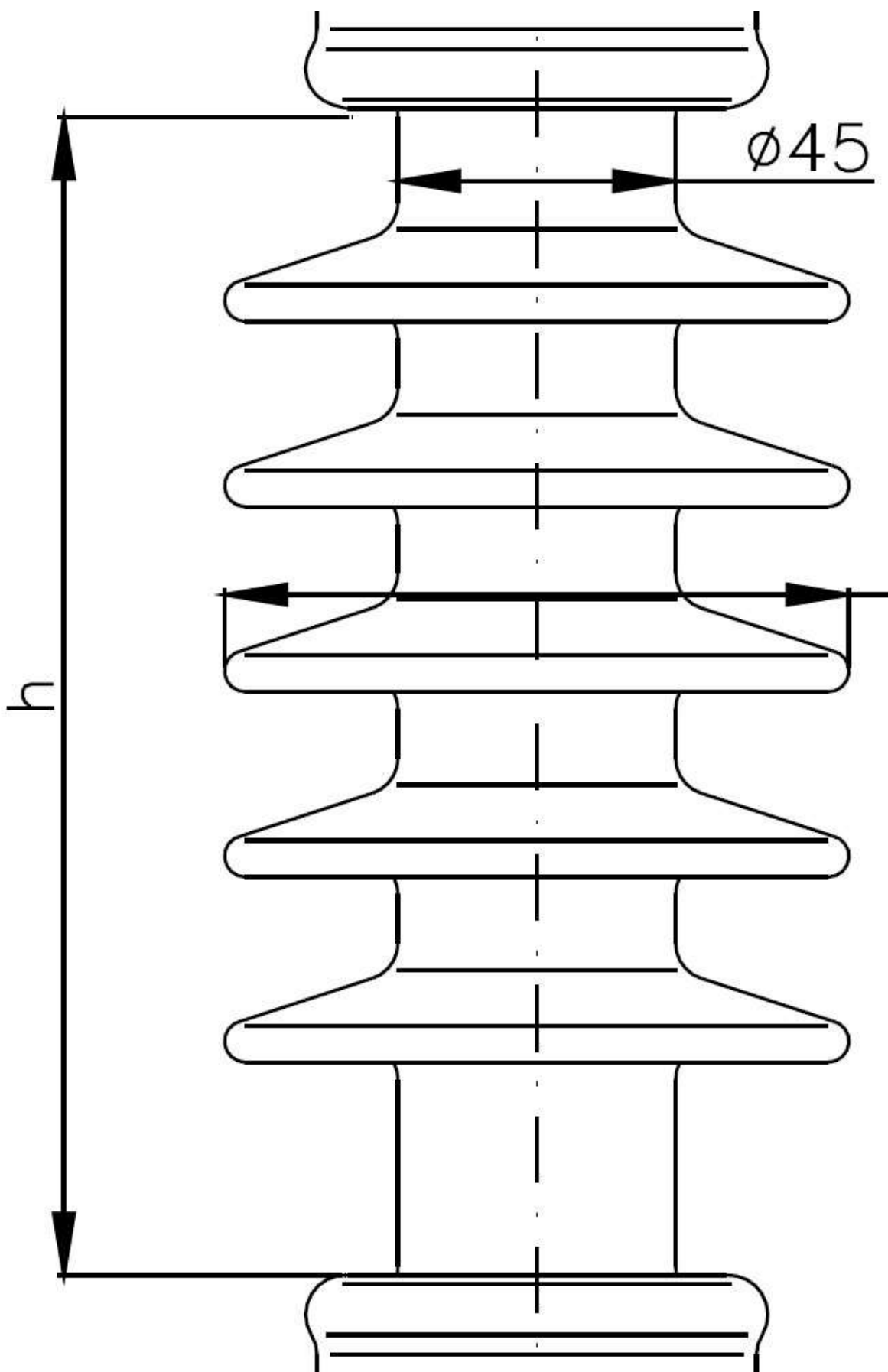
$$f = 5 \cdot f_{P2} + f_{P4} + 5 \cdot f_K \quad (9)$$

10. 6. Pytania kontrolne

1	Strefa zabrudzeniowa, jak dobiera się izolatory napowietrzne do terenów o różnym zanieczyszczeniu atmosfery.
2	Zależność napięcia przeskoku od drogi upływu.
3	Najwyższy prąd upływu I_h , krytyczny prąd upływu I_C , najwyższa zmierzona wartość prądu upływu I_{max} w ostatnim półokresie przed przeskokiem (wg koncepcji Prasada Vermy)..
4	Poziom alarmowy prądu upływu (the warning value of leakage current).
5	Budowa izolatorów kompozytowych.
6	Zalety izolatorów kompozytowych.

10. 7. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Prąd upływu na naturalnie zabrudzonych izolatorach porcelanowych i silikonowych. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 2008, s. 117-120
- [2] Chrzan K.L., : Leakage currents on naturally contaminated porcelain and silicone insulators. IEEE Transactions on Power Delivery. 2010, vol. 25, No. 2, pp. 904-910, <http://www.ieeeexplore.ieee.org/iel5/61/5437451/05427112.pdf?arnumber=5427112>
- [3] Holtzhausen J.P., Vosloo W.L., High Voltage Engineering, Practice and Theory, Stellenbosch University, 2008, Chapter 4



Rys. 6. Przekrój poprzeczny izolatora LP 45/5 w skali 1 : 1

ĆWICZENIE XI: PRĄD UPŁYWU NA ZABRUDZONYM IZOLATORZE

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student

Podpis prowadzącego

Zad. 1. Pomiar prądu za pomocą bocznika prądowego oraz sondy prądowej na równomiernej warstwie zabrudzeniowej (bez stref suchych i palących się luków)			
	Kanał górny oscyloskopu Sonda prądowa	20 mV / cm	mA _{peak}
	Kanał dolny oscyloskopu Bocznik prądowy o rezystancji R = 100 Ω	2 V / cm	mA _{peak}
		U ₂ = 20 kVrms	
Zad 2. Prąd po zapłonie luków			
	Kanał górny oscyloskopu Sonda prądowa	10 mV / cm	mA _{peak}
	Kanał dolny oscyloskopu Bocznik prądowy o rezystancji R = 100 Ω	1 V / cm	mA _{peak}
		U = 35 kVrms	
Zad 3. Napięcie i prąd palącego się luku. Zapłon luku powoduje zapad napięcia.			
	Kanał 1 Sonda prądowa	50 mV / cm	mA _{peak}
	Kanał 2 Dzielnik napięcia o przekładni 857 (załączona zwora) + sonda oscyloskopowa HC-OP20, przekładnia 10:1	2 V / cm	
		U = 30 kVrms	

Zad 4. Oblicz współczynnik kształtu izolatora LP 45/5

Zad 5. Oblicz napięcie przeskoku izolatora LP60/5 dla największej zmierzonej wartości prądu upływu I_h przy wartości napięcia U wykorzystując wzór (3) a następnie wzór (4) oraz wartości współczynników wydrukowanych tłustym drukiem na niżej załączonej informacji dodatkowej.

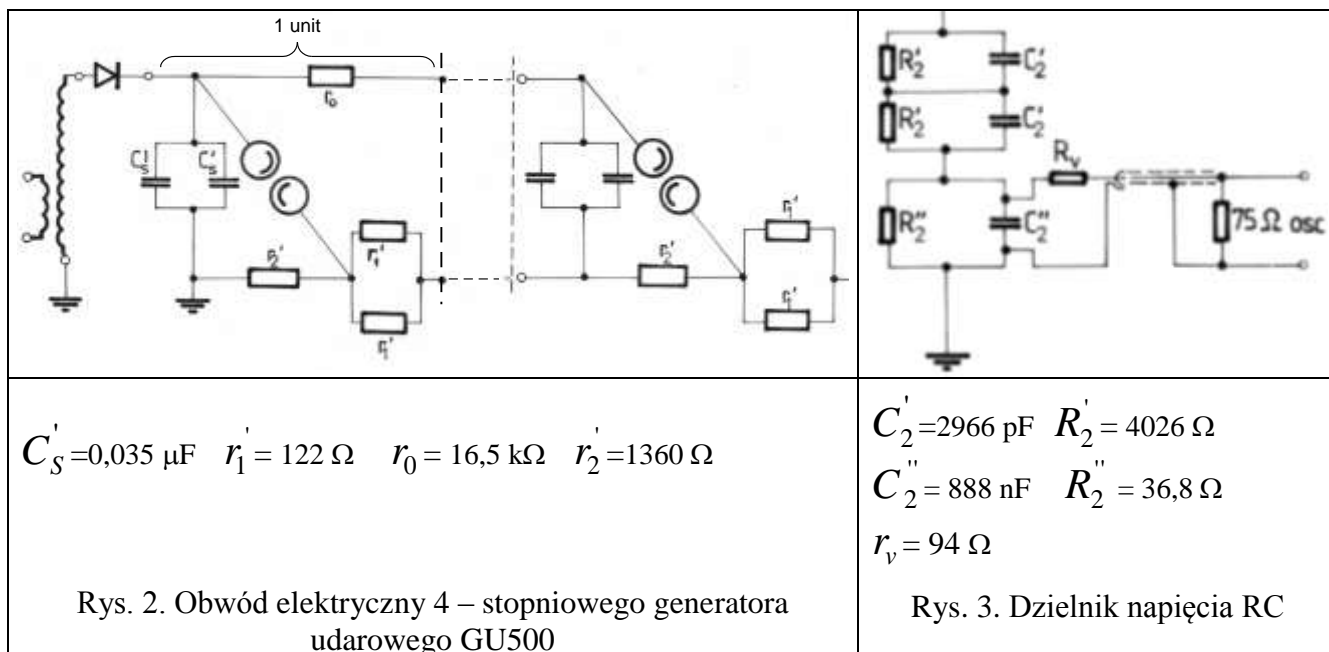
ĆWICZENIE XII

ZJAWISKO ODWRÓCENIA BIEGUNOWOŚCI W SŁABO NIERÓWNOMIERNYM POLU ELEKTRYCZNYM

11. 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest potwierdzenie występowania zjawiska odwrócenia biegunowości pomiędzy elektrodami iskiernika kulowego przy uderzeniach piorunowych. Dodatkowo należy zapoznać się z układem generatora uderowego Marxa.

11. 2. Układ pomiarowy

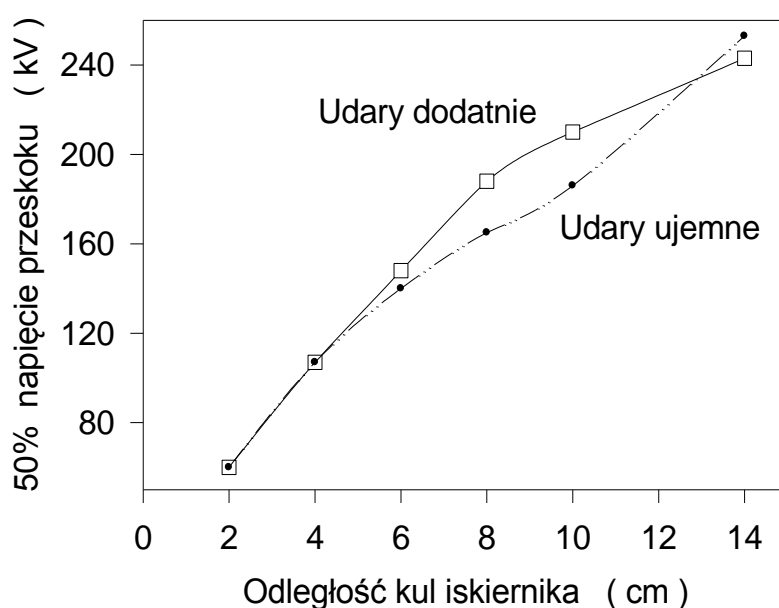


11. 3. Spis przyrządów i obiektów badań

- Pojemnościowo-rezystancyjny dzielnik napięcia typu SMCR 1500/500 TUR Dresden, przekładnia napięciowa **631**
- Precyzyjny woltomierz wartości szczytowej SV642 Haefely, zakresy pomiarowe:
- zakres niski 16 V – 160 V, zakres wysoki: 160 V – 1600 V, 2MΩ
- Iskiernik o średnicy kul **10 cm**

11. 4. Zadania pomiarowe i obliczeniowe

1	Wyznacz 50% udarowe napięcie przebicia o biegunowości dodatniej przy odległości kul badanego iskiernika 9 cm. Pomiary wykonaj metodą serii.
2	Wyznacz 50% udarowe napięcie przebicia o biegunowości ujemnej przy odległości kul badanego iskiernika 9 cm.
3	Na siatce Gaussa wyznacz: - 50% napięcie przebicia – $U_{50\%}$ - odchylenie standardowe – s Siatka Gaussa jest dołączona do ćwiczenia nr 5.
4	Skoryguj wyniki do normalnych warunków atmosferycznych. Przerysuj rys. 4 z publikacji [1] i zaznacz na nim otrzymane punkty + $U_{50\%}$ and - $U_{50\%}$.



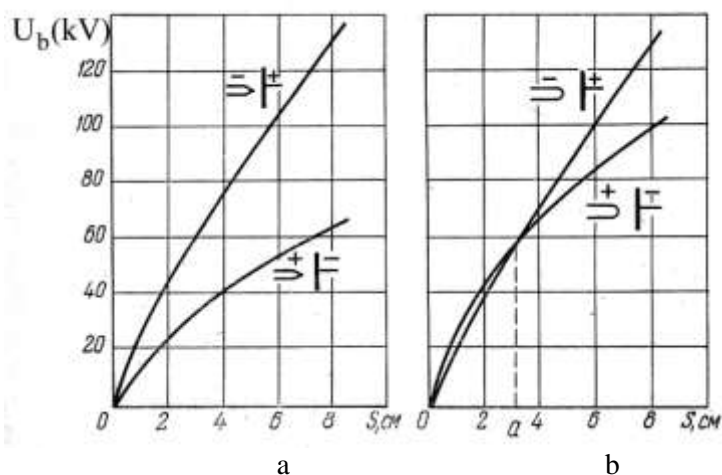
Rys. 4. Napięcie przebicia iskiernika o średnicy 10 cm w zależności od biegunowości udarów [1].

11. 5. Informacje dodatkowe

W polu równomiernym (np. w układzie płyta-płyta) napięcie przebicia nie zależy od biegunowości. Natomiast w układach o polu bardzo nierównomiernym wpływ biegunowości napięcia jest bardzo duży. Najlepszym przykładem jest układ ostrze-płyta gdzie przy małych odstępach izolacyjnych różnice wynoszą jak 2 : 1 a napięcie przebicia o biegunowości dodatniej na elektrodzie ostrzowej jest niższe niż przy biegunowości ujemnej (fig. 6a).

W układzie z elektrodą o zakończeniu półsferycznym, dodatnie napięcie przebicia jest nieznacznie mniejsze od napięcia przebicia o biegunowości ujemnej gdy odległość elektrod jest mniejsza od „a”(rys. 6b). Pole elektryczne w tym układzie jest słabo nierównomierne gdy $S < a$, wówczas napięcie początkowe jonizacji jest równe napięciu przebicia $U_0 = U_p$. Należy jednak zaznaczyć, że napięcie początkowe jonizacji o biegunowości dodatniej jest niższe od napięcia początkowego jonizacji o biegunowości ujemnej. Natomiast gdy $S > a$, wówczas pole elektryczne staje się bardziej nierównomierne i napięcie przebicia o biegunowości dodatniej na elektrodzie prętowej staje się niższe niż napięcie o biegunowości ujemnej.

Dla większych odstępów kształt zakończenia elektrody prętowej nie jest istotny, napięcie przebicia o biegunowości dodatniej jest wówczas mniejsze.



Rys. 6. Napięcie przebicia w układzie pręt- płyta w zależności od biegunowości napięcia na pręcie i od kształtu zakończenia pręta [2]

11. 6. Pytania kontrolne

1	układy elektrod o polu równomiernym, słabo nierównomiernym i bardzo nierównomiernym.
2	Definicja współczynnika nierównomierności pola elektrycznego β .
3	Wpływ biegunowości napięcia na elektryczną wytrzymałość układów izolacyjnych mających różny współczynnik nierównomierności pola elektrycznego β .
4	Metody wyznaczania 50% napięcia przebicia: metoda serii i metoda góra-dół.
5	Pomiar wysokiego napięcia za pomocą iskiernika kulowego.
6	Korekta wyników pomiaru napięcia przebicia ze względu na warunki atmosferyczne.
7	Woltomierz wartości szczytowej.
8	Generator udarowy Marxa, zasada działania, schemat elektryczny, sprawność napięciowa.

11. 7. Literatura

- [1] Chrzan K.L., Wytrzymałość izolatorów kołpakowych przy udarach piorunowych. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 8, 2008, s. 40-43
 [2] Tiniakov N.A., Stiepanshuk K.F., Technika wysokich naprizenij. (in Russian) Wyzshaja szkola, Minsk 1971

ĆWICZENIE XII: ZJAWISKO ODWRÓCENIA BIEGUNOWOŚCI W SŁABO NIERÓWNOMIERNYM POLU ELEKTRYCZNYM

Data pomiarów

Skład grupy

1. Sprawozdawca
2. Student
3. Student
4. Student
5. Student
6. Student

Podpis prowadzącego

Warunki klimatyczne: T =°C, p = hPa, RH =%

$\delta =$

1. Wyznaczenie dodatniego napięcia przeskoku iskiernika o średnicy kul 10 cm, według metody serii, przy odstępach kul s = 9 cm

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV _P																			
P lub N																				
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										U =		kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia = %						
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										U _N =		kV _P								

P – przebicie, N – nie, bez przebicia

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	kV _P																			
P lub N																				
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										U =		kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia = %						
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										U _N =		kV _P								

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										$U =$					kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia				
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										$U_N =$					kV _P		$=$ %				

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										$U =$					kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia				
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										$U_N =$					kV _P		$=$ %				

2. Wyznaczenie ujemnego napięcia przeskoku iskiernika o średnicy kul 10 cm, według metody serii, przy odstępnie kul $s = 9$ cm

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										$U =$					kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia				
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										$U_N =$					kV _P		$=$ %				

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał										$U =$					kV _P		Prawdopodobieństwo przebicia				
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych										$U_N =$					kV _P		$=$ %				

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał $U =$ kV _P													Prawdopodobieństwo przebicia $=$ %								
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych $U_N =$ kV _P																					

Napięcie ładowania pojedynczego stopnia generatora $U_L = \dots\dots$ kV										Odległość pomiędzy kulami iskierników zapalających $= \dots\dots$ mm											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
U	kV _P																				
P lub N																					
Wartość średnia szczytowa z prób gdzie układ wytrzymał $U =$ kV _P													Prawdopodobieństwo przebicia $=$ %								
Wartość skorygowana do normalnych warunków atmosferycznych $U_N =$ kV _P																					

ZAŁĄCZNIK A

POKAZY EKSPERYMENTÓW W LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ

W rozdziale tym pokazanych jest kilka popularnych eksperymentów

1. Wybuch cienkich przewodów
2. Uderzenie wyładowania elektrycznego w powierzchnię wody
3. Płomień w polu elektrycznym
4. Cząsteczki spienionego polistyrenu w stałym polu elektrycznym
5. Wyładowania jarzeniowe jako ilustracja prawa Paschena
6. Wyładowania kaskadowe w bardzo nierównomiernym polu elektrycznym
7. Silnik napędzany wiatrem elektrycznym
8. Świetlówki w polu elektrycznym

A. 1. Wybuch cienkich przewodów

Od dawna wiadomo, że prąd wyładowania piorunowego przepływając przez metalową rurę odprowadzającą wodę z rynien może ją sprasować do kształtu przypominającego zdeformowany metalowy drążek o znacznie mniejszej średnicy. Prąd płynący w tym samym kierunku po obu stronach rury powoduje ich wzajemne przyciąganie co może spowodować deformację. Jednak zachowanie cienkiego przewodu pod wpływem przepływającego prądu jest odmienne. Prąd o gęstości 10^5 A/cm² powoduje rozciąganie tensometryczne i elektroplastyczność metalu co prowadzi do gwałtownego rozpadu. Gęstość prądu większa od 10^7 A/cm² powoduje eksplozję [1]. Zjawisko wybuchu cienkich przewodów znane jest od 200 lat, po raz pierwszy opisał je Edward Nairne w 1774. Jest wykorzystywane przez fizyków do generacji i utrzymywania plazmy, do wyrobu metalicznych nanocząsteczek lub do generacji fali impulsowych [2].

Eksperyment 1:

Połącz cienki metalowy drucik (średnica około 0,04 mm) z generatorem udarowym Marxa a drugi koniec z małym izolatorem wsporczym postawionym na uziemionej płycie (na rys. 1 widoczny biały element w prawym dolnym rogu). Naładuj generator do napięcia rzędu 500 kV. Otwarty, nieuziemiony koniec drutu zwiększa prawdopodobieństwo i siłę eksplozji. Wzrost prądu po wyzwoleniu generatora i przeskoaku na izolatorze wsporczym jest szybszy.



Rys. 1. Wybuch drucika o średnicy 0,04 mm i długości 15 m w hali wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej.

A. 2. Uderzenie wyładowania elektrycznego w powierzchnię wody

Uderzenia piorunów w ziemię pozostawiają czasami na powierzchni rozgałęzione ślady. Świadczy to, że wyładowania elektryczne rozwijają się po powierzchni, koncentrycznie od punktu uderzenia (rys. 2). Zjawisko to jest podobne do wyładowań rozwijających się pod ziemią z pionowego uziomu. Duża rezystywność gruntu oraz duża amplituda prądu sprzyjają rozwojowi wyładowań powierzchniowych. Wyładowania powierzchniowe rozwijające się z punktu uderzenia po powierzchni gruntu są niebezpieczne dla ludzi i zwierząt, ponieważ ich długość może przekroczyć 10 m [3].



Rys. 2. Koncentryczne ślady wyładowań spowodowanych przez uderzenie pioruna do chorągiewki [3].

Rozgałęzione wyładowania można zaobserwować nawet na powierzchni wody po uderzeniu pioruna [4]. Jednakże rezystywność wody w stawach, jeziorach lub rzekach jest setki razy mniejszą od rezystywności gruntu. Dlatego Moore wraz ze współpracownikami zaproponował dodatkowy mechanizm [4]. Lider odgórny ma najczęściej biegunowość ujemną, gdy zbliży się do powierzchni wody, indukuje na niej ładunek o biegunowości przeciwnej. Stała ładowania wody $\tau = \rho \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ jest rzędu 10 μs , czyli jest tak krótka, że lider odgórny jest w stanie spolaryzować warstwę powierzchniową wody. Oczywiście wyładowanie elektryczne nie może przeniknąć pod wodę i dlatego rozdziela się na kilka rozgałęzień przyciąganych do powierzchni przez ładunki o przeciwnej biegunowości.

Eksperyment 2:

Uziemiony zbiornik z blachy miedzianej o kształcie półsfery o średnicy 1,2 m został wypełniony wodą wodociągową (o konduktywności około 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Aluminiowy pionowy pręt powieszono 0,8 m ponad lustrem wody i połączono z generatorem Marxa. Przebicie powietrza spowodowało pojawienie się kilkunastu iskier rozchodzących się promieniście na powierzchni wody (rys. 3).



Rys. 3. Wyładowanie z generatora Marxa (udar piorunowy normalny) do zbiornika wypełnionego wodą wodociągową.

A. 3. Płomień w polu elektrycznym

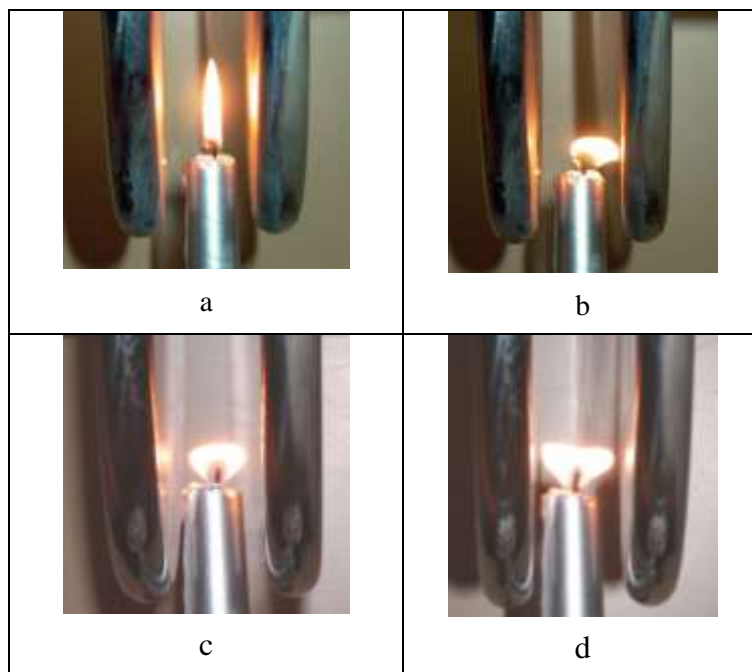
Linie napowietrzne przebiegają często przez lasy i inne tereny, na których możliwe są pożary. Wpływ wysokich płomienni i gęstego dymu w pobliżu linii elektroenergetycznych na wytrzymałość elektryczną powietrza oraz możliwość zwarć badano w Brazylii, Meksyku, Kanadzie, USA, RPA i Australii. W tych krajach pożary lasów, pastwisk, trzciny cukrowej i zarośli często zagrażają liniom elektroenergetycznym. Wyłączenia linii spowodowane pożarami zdarzają się także w Polsce. Przeprowadzone badania pozwoliły wyjaśnić przyczyny powodujące zmniejszenie się wytrzymałości elektrycznej powietrza w obecności płomieni.

Płomień jest rodzajem plazmy w której molekuly powietrza są chemicznie lub termicznie zjonizowane. Koncentracja jonów w płomieniu palącym się w powietrzu a wytworzonym z propanu jest rzędu $10^9 - 10^{12} / \text{cm}^3$. Większość jonów ma ładunek dodatni [5]. Niska koncentracja jonów ujemnych wynika prawdopodobnie z faktu, że większość ładunków ujemnych jest przenoszona przez wolne elektrony. Źródłem jonów i wolnych elektronów w płomieniu są molekuly o niskim potencjale jonizacyjnym, np. węgiel (potencjał jonizacyjny grafitu wynosi 4,35 eV). Oczywiście intensywność procesów jonizacyjnych wzrasta wraz z temperaturą. Jak wspomniano już wcześniej, w płomieniu większość jonów ma ładunek dodatni, dlatego w stałym polu elektrycznym jest on przyciągany do ujemnej elektrody (rys. 4b). W polu przemiennym o częstotliwości 50 Hz płomień jest rozciągany pomiędzy elektrodami (rys. 4c, 4d). Wskutek niestacjonarnych warunków w polu przemiennym, przesunięcie płomienia jest krótsze niż w polu stacjonarnym (porównaj rys. 4b i rys. 4c).

Napięcie przebicia iskiernika płyta – płyta przy odległości elektrod 3 cm i w normalnych warunkach atmosferycznych wynosi 61 kVrms. Po umieszczeniu płomienia świecy centralnie pomiędzy płytami, napięcie przebicia spada aż 10 razy. Wytrzymałość takiego układu zależy także od pozycji płomienia i od kształtu napięcia. Przy napięciu stałym najmniejszy spadek napięcia przebicia występuje gdy płomień pali się bezpośrednio przy elektrodzie ujemnej. Przy udarach krótkich, redukcja wytrzymałości jest mniejsza niż przy napięciu przemiennym lub stałym.

Spadek wytrzymałości pod wpływem płomieni i dymu jest wynikiem trzech czynników:

- wysoka temperatura zmniejsza gęstość powietrza
- w płomieniu następuje generacja ładunków elektrycznych
- wpływ cząsteczek dymu



Rys. 4. Płomień w polu elektrycznym, odstęp płyt 3 cm, a – bez napięcia, b – napięcie stałe DC 3 kV, prawa elektroda jest biegunowości ujemnej, c – napięcie przemiennie AC 3 kVrms, d – napięcie przemiennie AC 6 kVrms [6]

A. 4. Cząsteczki spienionego polistyrenu w stałym polu elektrycznym

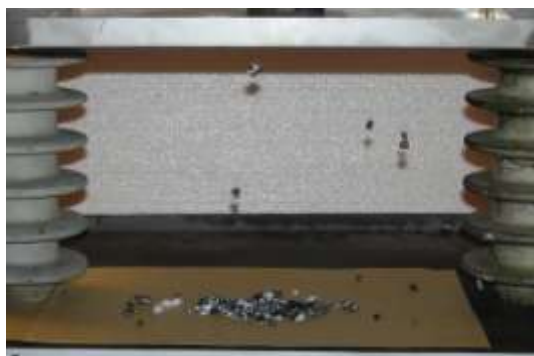
Sześćciofluorek siarki (SF_6), gaz stosowany w technice wysokich napięć jest czuły na zakłócenia pola elektrycznego spowodowane np. przez przewodzące opiłki. Takie drobiny mogą poruszać się swobodnie albo mogą być unieruchomione. Mogą to być cząsteczki przewodzące lub z materiału dielektrycznego. Drobiny dielektryczne nie są mniej szkodliwe ponieważ wpływają mniej na wytrzymałość gazu. Swobodne cząsteczki przewodzące są niebezpieczne dla rozdzielni okapturzonych GIS (Gas Insulated Substations) pracujących przy dużych natężeniach pola elektrycznego. Mogą one drastycznie zmniejszyć wytrzymałość SF_6 , redukując ją do aż 10 % w porównaniu ze stanem czystym.

Po naładowaniu się w polu, drobina unosi się i zaczyna się poruszać zgodnie z jego kierunkiem. Proces ten zależy od kilku czynników np. pola makroskopowego przy powierzchni cząsteczki, jej ciężaru, liczby Reynoldsa i lepkości gazu [7]. Ruch cząsteczek w polu elektrycznym zależy od kształtu napięcia. Najprostszym przypadkiem mamy przy napięciu stałym z elektrodą wysokonapięciową na górze a uziemioną elektrodą na dole. Gdy cząsteczka zbliży się do górnej elektrody (mając ładunek przeciwny do jej ładunku) wówczas małe wyładowanie pomiędzy cząsteczką a elektrodą może zainicjować przebiecie pełne. Gdy cząsteczka zderzy się z elektrodą, otrzymuje wówczas ładunek jej znaku i dlatego jest odpychana do dołu.

Eksperyment 4 :

Układ elektrod stanowią dwie równoległe płyty oddalone o 23 cm. Cząsteczki spienionego polistyrenu spryskano koloidalnym grafitem (GRAPHIT 33 produkcji Kontakt Chemie) aby ich powierzchni stały się przewodzące. Następnie położono je na uziemioną dolną elektrodę. Przy napięciu 46 kV ($E = 2 \text{ kV/cm}$), cząsteczki zaczęły się podnosić (rys. 5)

Okazuje się, że bez przewodzącej powierzchni, cząsteczki nie były w stanie się unieść nawet w polu o natężeniu 20 kV/cm.



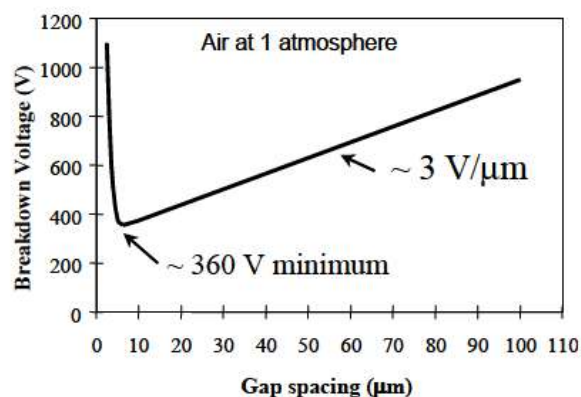
Rys. 5. Przewodzące cząsteczki poruszające się w stałym polu elektrycznym

A. 5. Wyładowania jarzeniowe jako ilustracja prawa Paschena

Najprostsza forma prawa Paschena mówi, że napięcie początkowe jonizacji U_0 jest funkcją iloczynu ciśnienia gazu p i odległości elektrod s :

$$U_0 = f(p \cdot s)$$

Ta zależność jest nieliniowa i ma dla danego gazu charakterystyczne minimum. Dla powietrza atmosferycznego najmniejsze napięcie U_0 **360 V** występuje przy iloczynie $p \cdot s =$ **67 Pa · cm**. Co oznacza, że przy ciśnieniu atmosferycznym minimalne napięcie U_0 obserwuje się przy bardzo małej odległości elektrod wynoszącej **5 μm** (rys. 6).



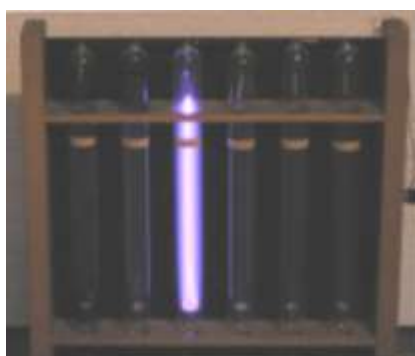
Rys. 6. Krzywa Paschena – napięcie początkowe jonizacji (przebiecia) w zależności od odległości elektrod przy ciśnieniu powietrza 1013 hPa.

W zestawie 6 szklanych cylindrów odległość elektrod jest taka sama i równa 20 cm (rys. 7). Jednakże ciśnienie gazu w każdym cylindrze jest różne. Najmniejsze ciśnienie $p = 0,13 \text{ hPa}$ jest w zbiorniczku lewym. Ciśnienia w kolejnych cylindrach wynoszą 0,18; 4; 8; 13; and 53 hPa (z lewa do prawa).

Tab. 1. Ciśnienia, iloczyny ciśnienia i odległości elektrod oraz napięcia przebiecia w zestawie z rys. 7.

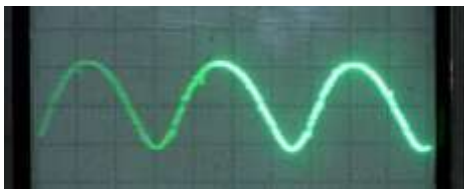
Ciśnienie	hPa	0,13	0,18	4	8	13	53
Ciśnienie * odległość	hPa·cm	2,6	3,6	80	160	260	1060
Napięcie jonizacji	V_{peak}			≈ 360			
Napięcie przebiecia	V_{peak}			2700			

Gdy doprowadzi się napięcie przemiennie 50 Hz do wszystkich cylindrów, wówczas cylinder z iloczynem $p \cdot s = 80 \text{ hPa} \cdot \text{cm}$ zaczyna świecić przy napięciu $2700 \text{ V}_{\text{peak}}$ (rys. 7). Oznacza to, że doświadczalny iloczyn $p \cdot s$ zgadza się z wartością podawaną w podręcznikach. Jednak wartość napięcia przy której dokonuje się tej obserwacji jest znacznie większa niż wartość teoretyczna $U_0 = 360 \text{ V}$. Mimo to nie ma tu sprzeczności z teorią. Prawo Paschena opisuje przebiecie w polu jednorodnym. W naszym eksperymencie pole jest nierównomierne (elektrody nie są okrągłymi płytkami o średnicy kilkakrotnie mniejszymi od ich odległości). Obserwowane świecenie jest oznaką przebiecia lub procesów przedprzebieciowych. W polu nierównomiernym napięcie przebiecia jest znacznie większe od napięcia początkowego jonizacji. Napięcie początkowe zmierzone miernikiem wyładowań niezupełnych wyniosło właśnie $350 \text{ V}_{\text{peak}}$. Jednak ładunek pozorny (intensywność jonizacji) jest zbyt niska aby można było to dostrzec w zaciemnionym pomieszczeniu.



Rys. 7. Emisja światła przy napięciu przemiennym $2700 \text{ V}_{\text{peak}}$ w cylindrze z iloczynem $p \cdot s = 80 \text{ hPa} \cdot \text{cm}$.

Gdy zastosuje się napięcie przemiennie o większej częstotliwości 5 kHz o amplitudzie 1100 V_{peak} (rys. 8), wówczas świecenie obserwuje się nawet w trzech cylindrach (rys. 9). Przy tak dużej częstotliwości napięcia, plazma jest niestabilna i dlatego mimo mniejszego napięcia U₀ (w porównaniu z f = 50 Hz) nie występuje przebiecie pełne.



Rys. 8. Napięcie generowane przez przenośny iskrowy próbnik próżni PIN-21 produkcji ZOPAP Warszawa.



Rys. 9. Jonizacja gazu w trzech cylindrach pod napięciem AC 1100 V_{peak} o częstotliwości 5 kHz.

A. 6. Wyladowania kaskadowe w bardzo nierównomiernym polu elektrycznym

Układ elektrod składa się z 16 metalowych rurek o długości 38 cm (rys. 10). Przerwa powietrzna pomiędzy dwoma rurkami ma długość 24 cm, zatem całkowita długość przerw powietrznych wynosi 360 cm (tab. 2). Drewniana listwa i dwie wędkarskie żyłki zabezpieczają mechaniczną stabilność konstrukcji o długości 10 m. Łańcuch metalowych rurek jest nieco podobny do łańcucha izolatorów kołpakowych z bardzo małą pojemnością własną pomiędzy kołpakiem a trzonkiem. Pojemność ta wynosi około 30 pF, natomiast pojemność rurka – rurka można obliczyć z następującego wzoru [8]:

$$C_0 \cong \frac{4\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{l}{a} + \ln \frac{2h+2l}{2h+l}} = 12,3 \text{ pF}$$

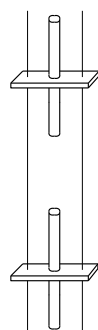
gdzie: l – długość rurki, $2h$ – długość przerwy powietrznej, $2a$ – średnica rurki

Napięcie wzdłuż łańcucha 15 izolatorów kołpakowych zawieszonych na słupie na rozkłada się bardzo nierównomiernie (współczynnik nierównomierności około 3). Rozkład napięcia wzdłuż szeregu przerw powietrznych jest jeszcze bardziej nierównomierny. Jest to spowodowane mniejszą pojemnością między rurkami niż pojemność własna izolatora kołpakowego oraz z powodu innego zawieszenia w laboratorium. Dlatego pojemności rozproszenia do ziemi są większe niż pojemności do ziemi wzdłuż łańcucha izolatorów na słupie (mniejsze wymiary konstrukcji słupa i wyższe zawieszenie izolatorów nad ziemią).

Gdy do łańcucha metalowych rurek dołączy się napięcie przemiennie, pierwsze wyładowania elektryczne pojawiają się w pierwszej od podłogi przerwie powietrznej gdyż pole elektryczne jest tam najwyższe. Ze wzrostem napięcia wyładowania wydłużają się i zapalają w kolejnych przerwach powietrznych. Gradient napięcia wyładowania liderowego jest rzędu 1 kV/cm. Dlatego wysoki potencjał jest przesuwany do zakończenia wyładowania co sprzyja jego dalszemu rozwojowi. Ten tzw. mechanizm kaskadowy jest odpowiedzialny za rozwój bardzo długich wyładowań elektrycznych. Przebiecie pierwszej przerwy następuje przy napięciu 330 kV. Przebiecie ostatniej przerwy (wszystkich przerw) ma miejsce przy napięciu „zaledwie” 380 kV. Przebity jest sumaryczny odstęp powietrza o długości aż 360 cm. Przy tym napięciu następuje przebiecie dużego iskiernika kulowego o odstępzie zaledwie 18 cm. Po zapłonie iskiernika kulowego następuje zwarcie, napięcie spada i wyładowania wzdłuż łańcucha metalowych rurek gasną (rys. 12). Jest warte podkreślenia, że przerwa między kulami iskiernika (pole równomierne) jest aż 20 razy krótsza od sumarycznej przerwy pomiędzy metalowymi rurkami o polu bardzo nierównomiernym. To pokazuje jak przebiecie gazu zależy od rozkładu pola elektrycznego.

Tab. 2. Wymiary łańcucha metalowych rurek

Length of one metal pipe	38 cm
Diameter of metal pipe	2 cm
Number of air gaps	15
The total length of air gaps	360 cm



Rys. 10. Łańcuch metalowych rurek



Fig. 11. Przebiecie iskierników w łańcuchu metalowych rurek

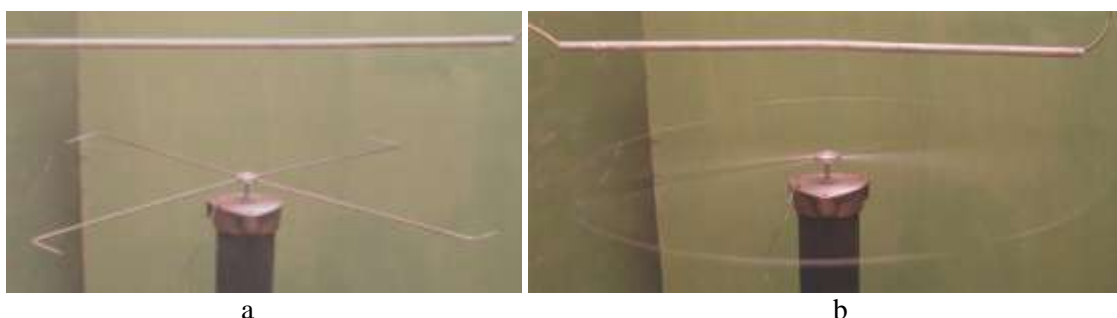


Fig. 12. Zapłon iskiernika kulowego

A. 7. Silnik napędzany wiatrem elektrycznym

W wyładowaniu koronowym w powietrzu, zderzenia naładowanych cząsteczek z cząsteczkami obojętnymi wywołują ruch gazu przy elektrodzie ostrzowej zwanym wiatrem elektrycznym. Energia elektryczna jest w większości ($\approx 90\%$) tracona na ciepło a zaledwie 1% jest wykorzystywany na generację wiatru elektrycznego. Szybkość wiatru w układzie ostrze – płyta może osiągnąć 160 m/s jeśli prąd wzrośnie do $70 \mu\text{A}$ [9].

Rys. 13a pokazuje krzyżowy wirnik z zaostrzonymi końcami zamontowany na łożysku kulowym. Konstrukcja jest umieszczona na izolatorze wsporczym z uziemioną górną elektrodą. 30 cm nad wirnikiem zawieszono aluminiową rurkę połączoną z transformatorem 110 kV. Przy napięciu 50 kV wirnik zaczyna się powoli kręcić wskutek wyładowań koronowych z ostrzy. Prędkość obrotów rośnie wraz ze wzrostem napięcia (rys. 13b).



Rys. 13. Nieruchomy wirnik przy wyłączonym napięciu (a) i wirnik w ruchu przy napięciu 100 kV (b)

A. 8. Świetlówki w polu elektrycznym

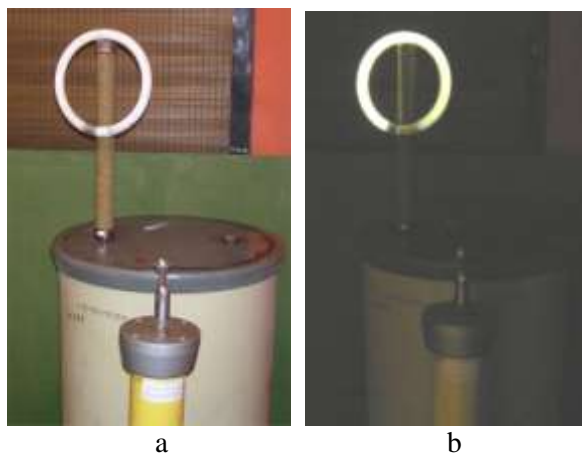
Gdy pole elektryczne osiągnie odpowiednie natężenie, wówczas następuje jonizacja i świecenie gazu wewnątrz świetlówki. Oczywiście te elementy świetlne normalnie pracują przy zasilaniu z sieci elektrycznej. Gdy świetlówkę umieści się w dostatecznie wysokim zewnętrznym polu elektrycznym, może również zacząć świecić nawet nie będąc przyłączoną do sieci elektrycznej. Zasada ta jest wykorzystywana w różnych wskaźnikach napięcia montowanych w rozdzielniach elektrycznych.

Rysunek 14 i 15 pokazuje zwykłe świetlówki używane do oświetlenia pomieszczeń. Świetlówka o długości 120 cm została położona poziomo na dwóch izolatorach wsporczych w pobliżu transformatora 110 kV (rys. 14a). Przy napięciu 50 kV obserwuje się słabe świecenie. Intensywność świecenia wzrasta z napięciem i może być zarejestrowana za pomocą zwykłego aparatu cyfrowego w przyciemnionym pomieszczeniu (rys. 14b).



Rys. 14. Świetlówki w polu elektrycznym transformatora 110 kV.
a – sposób ułożenia, b – światło widoczne w przyciemnionym pomieszczeniu

Okrągła świetlówka została zawieszona na rezystorze tłumiącym przykręconym do transformatora 110 kV (rys. 15a). W porównaniu ze świetlówką prostą, która nie była tak “bezpośrednio” połączona z transformatorem, intensywność światła jest w tym przypadku większa (rys. 15b). Po prostu okrągła świetlówka znajduje się w polu o większym natężeniu.



Rys. 15. Okrągła świetlówka w polu elektrycznym transformatora 110 kV.
a – sposób ułożenia, b – świecenie w przyciemnionym pomieszczeniu

A. 9. Literatura

- [1] Pike-Bieguński M., Rozpad wybuchowy drutu. Przegląd Elektrotechniczny nr 1/1999, pp. 11-15.
- [2] Sen P., Ghosh J. et al. Preparation of Cu, Ag, Fe and Al nanoparticles by exploding wire technique. Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.), Vol. 115, Nos 5 & 6, OctDec. 2003, pp. 449-508.
- [3] Colton, F. B., Lightning in action. National Geographic Magazine, Vol. 97, June 1950, National Geographic Society, Washington, D. C., p. 819.
- [4] Moore C.B., Aulich G.D., Rison W., An examination of lightning-strike-grounding physics. www.lightningsafety.com/nlsi_lhm/Radials.pdf.
- [5] Mousa A.M.: Protecting fireman against fire-induced flashovers. IEEE Trans. on Power Delivery, Jan. 1990, pp. 297-302.
- [6] Chrzan K., Wróblewski Z., The threat caused by fires under high voltage lines. 2nd International Conference on Advances in Processing, Testing and Applications of Dielectric Materials. APTADM, Wrocław 2004, pp. 208-211.
- [7] K. Sakai, S. Tsuru, D. L. Abella and M. Hara, Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in DC electric field between diverging conducting plates in atmospheric air. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 1, February 1999, pp. 122-130..
- [8] Iossiel J.J., Koczanow E.S., Strunskij M.G., Razczet elektriczeskoj emkosti. Energija, Leningrad 1969.
- [9] Noel F., Batina J., Peyrous R., Held B., Electric wind in point-to-plane corona discharge. Comparison between modelling and experiment. 13 th Conference on Gas Discharges, Glasgow 2000, pp. 957-960.

ZAŁĄCZNIK B

BEZPIECZEŃSTWO W LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ

B. 1. Konieczność troski o bezpieczeństwo

Zachowanie ostrożności podczas pracy w laboratorium wysokich napięć jest sprawą najwyższej wagi ponieważ nawet napięcie wyższe od 40 V może być niebezpieczne. Niebezpieczeństwo dla ludzi związane jest nie tylko z bezpośrednim dotknięciem przewodu pod napięciem ale również z wpływem innych czynników jak: pole elektryczne o dużym natężeniu, sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne, łuk zwarciový, prąd upływu na wilgotnych i zabrudzonych drążkach izolacyjnych, wzrost potencjału po przepływie prądu zwarciového (napięcie dotykowe i krokowe).

Niebezpieczne oddziaływanie prądu elektrycznego na ludzi polega zwłaszcza na tym, że może zakłócić pracę układu krążenia, oddychania, systemu nerwowego i mięśni. Śmiertelne mogą być fibrylacje komór sercowych spowodowane zazwyczaj prądem większym od 60 mA. Porażenie wysokim napięciem powoduje najczęściej poważne uszkodzenia ciała (oparzenia, zwięglenia przez łuk).

Podstawowe środki bezpieczeństwa personelu [1,2]:

- Strefy niebezpieczne w pobliżu wysokonapięciowego obwodu muszą być oznaczone w widoczny sposób i ogrodzone przez ścianki, siatki aby uniemożliwić wstęp.
- Wszystkie drzwi muszą mieć blokady wyłączające automatycznie napięcie po ich otwarciu.
- Zanim dotknie się urządzenie wysokiego napięcia po zakończeniu próby, trzeba je uziemić w widoczny, pewny sposób. Służą do tego celu specjalne drążki uziemiające. Specjalnej troski wymagają obwody napięcia stałego z kondensatorami.
- Wszystkie metalowe części stanowiska, które nie są pod wysokim potencjałem podczas próby muszą być solidnie uziemione. Każdy element w laboratorium powinien być dobrze uziemiony albo znajdować się na wysokim potencjale. Elementy na wolnym potencjale mogą stwarzać problemy.
- Zaleca się aby na podłodze pola probierczego znajdowała się miedziana siatka lub płyta. Należy połączyć z nią zaciski uziemiające aparatury tak aby jego indukcyjność była jak najmniejsza wykorzystując szerokie taśmy miedziane.
- Wszystkie kable pomiarowe oraz połączenia uziemiające powinny być tak ułożone aby nie tworzyły dużych pętli. Sygnały pomiarowe powinny docierać do aparatury przy wykorzystaniu kabli koncentrycznych.
- Przerwy powietrzne pomiędzy badanymi obiektami a innymi elementami powinny być większe od $1,5 \cdot S$, gdzie S jest odległością przy której możliwy jest przeskok lub przebicie. Zapewnia to również mały wpływ zewnętrznych elementów na wynik badań.
- Zabrania się pracy pod wysokim napięciem jednej osobie.

B. 2. Zasady bezpieczeństwa w studenckim laboratorium wysokich napięć

1. Studenci zostają pouczeni o zasadami bezpieczeństwa elektrycznego i ochrony przeciwpożarowej w laboratorium podczas pierwszych zajęć. Zapoznają się z poszczególnymi elementami stanowisk pomiarowych i ich obsługą, włączaniem i wyłączaniem napięcia, uziemianiem i pomiarami.
2. Studenci przed ćwiczeniami zobowiązani są do poznania teorii i zadań pomiarowych.
3. Należy na początku sprawdzić stanowisko pomiarowe, połączenia wysokonapięciowe, odstępów izolacyjne, stan i ciągłość przewodów uziemiających.

Grupa powinna podzielić się celem sprawnego wykonania pomiarów. Student, który będzie wykonywać sprawozdanie jest kierownikiem zespołu. Jedna osoba dokonuje odczytów aparatury pomiarowej, inna dokonuje operacji włączania/wyłączania napięcia.

4. Studenci powinni otrzymać zezwolenie prowadzącego na pierwsze włączenie napięcia.
5. Zezwala się na wejście w pole probiercze dopiero po otwarciu wyłącznika i odłącznika z widoczną przerwą (uznaje się, że palenie się zielonej lampki nie jest dostatecznie pewnym wskaźnikiem braku napięcia).
6. Zabrania się pracy w polu probierczym jeśli drążek uziemiający nie jest zawieszony na wysokonapięciowej elektrodzie źródła napięcia.
7. Drzwi do pola probierczego muszą być otwarte jeśli w polu znajduje się osoba (zapewnia to otwarte styki blokady).
8. Zanim zostanie włączone wysokie napięcie należy sprawdzić:
 - czy jest ktoś w polu probierczym ?
 - czy drążek uziemiający został zdjęty z elektrody wysokonapięciowej źródła napięcia ?
 - czy regulator napięcia jest w pozycji „zero” ?
9. Osoba odpowiedzialna za operacje załączania powinna być przygotowana do szybkiej reakcji w przypadku nieoczekiwanych przebić lub przeskoków.
10. Zabrania się zabawy z przyciskami wyłącznika i dźwigni odłącznika gdy w polu probierczym znajdują się osoby.
11. Nie używaj wody do gaszenia ognia, stosuj gaśnicę z dwutlenkiem węgla lub z innym suchym środkiem gaśniczym.
12. Grupa studencka musi się składać z kilku osób. Jedna osoba nie może sama wykonywać pomiarów.
13. Warunkiem dopuszczenia do ćwiczenia może być kontrola przygotowania studentów (pisemna lub ustna).
14. Osoby postronne nie mogą wchodzić do laboratorium podczas wykonywania ćwiczeń.
15. Zanim grupa opuści laboratorium, napięcie musi być wcześniej wyłączone, drążek uziemiający założony na elektrodę wysokonapięciową źródła napięcia a drzwi do pola probierczego muszą pozostawać otwarte.

B. 3. Literatura

- [1] J.P. Holtzhausen, W.L. Vosloo, High Voltage Engineering, Practice and Theory, Stellenbosch University, 2008, Chapter 6.
- [2] Abdel-Salam M., Anis H., El-Morshedy A., Radwan R., High voltage engineering, theory and practice. Marcel Dekker, New York, Basel 2000.

ZAŁĄCZNIK C

OPIS TECZKI NA SPRAWOZDANIA Z ĆWICZEŃ I PLANU ZAJĘĆ

INSTYTUT PODSTAW ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROTECHNOLOGII
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Laboratorium Wysokich Napięć

Rok akademicki

Grupa Laboratoryjna nr

Imię i nazwisko	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Zal

Ponieważ ćwiczenia IV i V wykonywane są na tym samym stanowisku, grupy studenckie nie mogą zajmować kolejnych stanowisk pomiarowych w następujących po sobie tygodniach. Taką możliwość ma jedynie grupa druga.

	Kolejny Tydzień Ćwiczeń							
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8
ćw. I	gr. 1				gr. 4		gr. 3	gr. 2
ćw. II	gr. 2	gr. 1				gr. 4		gr. 3
ćw. III	gr. 3	gr. 2	gr. 1				gr. 4	
ćw. IV	gr. 4		gr. 2		gr. 3		gr. 1	
ćw. V		gr. 4		gr. 2		gr. 3		gr. 1
ćw. VI		gr. 3	gr. 4	gr. 1	gr. 2			
ćw. VII			gr. 3	gr. 4	gr. 1	gr. 2		
ćw. VIII				gr. 3		gr. 1	gr. 2	gr. 4

ZAŁĄCZNIK D

FORMATKA DO SPRAWOZDANIA Z ĆWICZENIA

Politechnika wrocławska Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii	Jan Kowalski Jakub Sikora	Wydział Elektryczny Rok studiów II Termin: czwartek 9:15 Grupa laboratoryjna 1
LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ		
Data wykonania ćwiczenia	Pomiar strat dielektrycznych i wyladowań niezupelnych	Ocena
Numer ćwiczenia		Podpis sprawozdawcy

Cel ćwiczenia

Spis przyrządów

Układ probierczy

Tabele pomiarowe

Przykłady obliczeń

Rysunki

Wnioski

ZAŁĄCZNIK E

HISTORIA LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ

E. 1. Wstęp

W końcu XIX wieku zaczęto wykorzystywać energię elektryczną początkowo do oświetlania domów i ulic a wkrótce także do napędu maszyn. Pierwsze elektrownie miały niewielką moc i zasilaly tylko centra ówczesnych metropolii. Wzrost liczby odbiorców i wielkości obszarów zasilania powodował wzrost stosowanych napięć gwałtownie rozwijającej się sieci elektroenergetycznej. We Wrocławiu pierwsze próby oświetlenia lampami łukowymi obecnego placu Powstańców Warszawy przeprowadzono już w 1882 roku, w którym Thomas Edison zbudował elektrownię przy Pearl Street w Nowym Jorku. W zaledwie dziewięć lat później uruchomiono pierwszą elektrownię miejską na rogu ul. Menniczej i Wierzbowej, zasilającą tak jak na Manhattanie, sieć napięcia stałego 110 V. Nowa elektrownia, zwana „Główną” powstała w 1901 przy ul. Łowieckiej i zasilala napięciem stałym 220 V najbliższych odbiorców indywidualnych, napięciem 580 V sieć tramwajową a napięciem przemiennym 5 kV – stacje przetwórcze w innych częściach miasta. Do wybuchu I wojny światowej moc zainstalowana tej elektrowni osiągnęła 22 MW a miasto zostało całkowicie zelektryfikowane.

E. 2. Instytut Elektrotechniczny Politechniki Wrocławskiej (Technische Hochschule Breslau)

Budowę Politechniki rozpoczęto w 1906 roku na terenie o powierzchni 3,4 ha położonym nad Odrą pomiędzy trzema ulicami – Wybrzeżem Wyspiańskiego, Norwida i Smoluchowskiego. Politechnika składała się początkowo z Oddziału Budowy Maszyn, Oddziału Nauk Ogólnych, Instytutu Elektrotechnicznego, Instytutu Chemicznego i Instytutu Hutniczego. Architektura całego kompleksu nawiązuje do śląskiego renesansu zwłaszcza do zamku książąt oleśnickich. W laboratorium maszynowym (obecnie A-4) znajdowała się elektrociepłownia zasilająca budynki szkoły w energię elektryczną i ciepłą wodę, dysponująca dwoma maszynami parowymi o mocy 300 i 160 KM, silnikiem diesla o mocy 80 KM oraz dwoma generatorami napięcia stałego 220 V o mocy 250 kW i 100 kW.

Gmach dawnego Instytutu Elektrotechnicznego, nazywany dziś Starym Gmachem Elektrycznym (A-5) zajmuje obecnie Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. Budynek posiadał najnowsze zdobycze techniki, windę pasażersko-towarową i instalację c.o. sterowaną zdalnie przez pięć termometrów umieszczonych w różnych pomieszczeniach. W hali maszyn znajdowało się aż 9 zestawów silników napędzających różnego typu generatory DC lub AC (rys. 1). Hala była połączona dwoma kablami z oddaloną o 100 m elektrownią uczelni oraz jednym kablem z siecią miejską. Jeden zestaw z silnikiem prądu stałego i z generatorem 21 kVA 160 V służył do zasilania laboratorium wysokich napięć. Od 1909, a więc jeszcze w fazie organizacji, do 1939 roku Instytutem kierował Prof. Georg Hilpert a w latach 1939-1945 – Prof. Paul Boeing.



Rys. 1. Hala maszyn Instytutu Elektrotechnicznego przy budynku A-4

E. 3. Laboratoria wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej

Pierwsze laboratorium znajdowało się w obecnym pomieszczeniu 116 A-5, dysponowało transformatorem 20 kVA firmy Siemens-Schuckert-Werke o trzech zakresach napięcia 50, 100, 200 kV przełączanych na stronie niskiego napięcia 160 V (rys. 2). Drugi, niewidoczny na rys. 2 transformator 10 kVA miał również trzy zakresy 3,75; 7,5 i 15 kV. Sterowanie napięciem wykonywano na tablicy umieszczonej na ścianie, przed drewnianą kratą (rys. 2). Obok transformatora 200 kV znajdowała się cynkowa wanna o średnicy 1 m umieszczona na czterech izolatorach deltowych. Po wypełnieniu wanny olejem izolacyjnym można było w niej testować wytrzymałość dielektryków. Nad wanną zawieszono dyszę Koertinga do wytwarzania sztucznego deszczu. W następnych latach zbudowano w Instytucie generator udarowy 350 kV i oscylograf katodowy.



Rys. 2. Najstarsze laboratorium wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej w budynku A-5

W 1946 roku laboratorium wysokich napięć przeniesione zostało do sali gimnastycznej znajdującej się w piwnicy gmachu głównego A-1 (obecnie znajduje się tam Zakład Poligraficzny) przez przybyłego z Warszawy Prof. Jerzego Ignacego Skowrońskiego. Na parterze, w pomieszczeniach 126-130 urządzono Katedrę Wysokich Napięć. W laboratorium zamontowano pętlę Bindera - linię długą do pomiarów przebiegów falowych. Jest ona widoczna po prawej stronie rys. 3. W laboratorium tym pracowali asystenci Anatol Iwanowski, Roman Superat, Jerzy Fekecz i Jerzy Lisiecki.



Rys. 3. Drugie laboratorium wysokich napięć w budynku A-1

W 1953 Katedra Wysokich Napięć i afiliowany przy niej Zakład Materiałoznawstwa Przemysłowego Instytutu Elektrotechniki wprowadziły się do wybudowanego gmachu D-1. W budynku tym znajdują się trzy laboratoria wysokich napięć (hala duża o szerokości 16,4 m długości 26 m i maksymalnej wysokości 17 m (rys. 4), hala mała (rys. 5) i tzw. laboratorium studenckie). W latach 1950-tych w laboratorium zbudowano transformator Tesli oraz generator van der Graaffa (rys. 4). Dopiero w 1965 roku dużą halę wyposażono w transformator 800 kV i generator udarów piorunowych 1,8 MV, 15 kJ produkcji zakładów ZWAR w Warszawie. Generator napięcia stałego 1,3 MV wykonano w 1971 a

transformator 160 kV o dużym prądzie zwarcia w 1974. W następnym roku zbudowano komorę mgły solnej, w której testowano ograniczniki przepięć i izolatory. W 1991 zmontowano symulator impulsowych narażeń elektromagnetycznych do badania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń a w 2001 układ do wytwarzania udarów napięciowych o stromości do 4 kV/ns. Najcenniejszym urządzeniem pomiarowym jest referencyjny dzielnik do pomiaru napięć przemiennych lub stałych 160 kV oraz udarowych 500 kV firmy Haefely. W małej hali znajdują się transformator 350 kV i transformator 110 kV.

Laboratorium studenckie wyposażone jest m. in. w kilka transformatorów 110 kV, zestaw napięcia stałego 100 kV oraz generator udarowy 500 kV firmy TUR Dresden. Każdego roku w ramach Festiwalu Nauki Polskiej, w dużej hali urządzone są pokazy wyładowań elektrycznych dla publiczności a także dla studentów Wydziału Elektrycznego.



Rys. 4. Generator van der Graaffa (z lewej) i transformator Tesli (z prawej), lata 1960.



Rys. 5. Mała hala wysokich napięć w budynku D-1

We Wrocławiu są jeszcze 4 inne laboratoria wysokich napięć, w Instytucie Elektrotechniki przy ul. Marii Skłodowskiej-Curie, w Zakładzie Energetycznym Energia Tauron przy ul. Menniczej, dysponującym przewoźnym laboratorium z transformatorem 200 kV, w firmie Alstom Power (dawniej Dolmel) oraz w Dolnośląskiej Fabryce Maszyn Elektrycznych znajdującej się na terenie dawnego Dolmelu.

E. 4. Literatura

- [1] Lisiecki J., Laboratorium wysokich napięć Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Elektrotechniczne, nr 15-16, 1981, s. 366-367
- [2] Chrzan K.L., 100 lat wysokich napięć we Wrocławiu. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3, 2010, s. 46-49.
- [3] Chrzan K.L., 100 lat Instytutu Elektrotechniki i laboratorium techniki wysokich napięć Politechniki Wrocławskiej. Pryzmat 234, XII 2009, I 2010, s. 79-81

ZAŁĄCZNIK F

BIOGRAMY ZNANYCH POLSKICH WYSOKONAPIĘCIOWCÓW

Michał Doliwo-Dobrowolski (1862-1919)

Urodził się w Gątczynie koło St. Petersburga, zmarł w Heidelbergu, pochodził z mazowieckiej rodziny szlacheckiej herbu Doliwa. Szkołę średnią ukończył w Odessie, rozpoczął studia na Politechnice w Rydze a ukończył na Politechnice w Darmstadt. Był asystentem wybitnego elektrotechnika Prof. E. Kittlera. Pracował w firmie AEG, wraz z Nikołą Teslą jest twórcą techniki prądu trójfazowego. Opatentował silnik, transformator i system trójfazowy, uzyskał ponad 60 patentów. Zaprojektował trójfazową linię 15 kV z Lauffen do Frankfurtu nad Menem, która stanowiła bardzo ważny krok w rozwoju wysokich napięć.

Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP ustanowiło rok 2012 Rokiem Michała Doliwo-Dobrowolskiego [1]. Istnieje obszerna literatura o tym wybitnym elektrotechniku, również w języku niemieckim i rosyjskim.

Kazimierz Drewnowski (1881-1952)

Urodził się w Stanisławowie, zmarł w Zakopanem i został tam pochowany na cmentarzu zasłużonych. Studiował na Politechnice Lwowskiej i w Zurichu. W roku 1914 przebywał na Politechnice w Darmstadt. Był organizatorem służby łączności w wojsku polskim bezpośrednio po I wojnie światowej, komendantem Głównej Szkoły Artylerii i Inżynierii. Na Politechnice Warszawskiej utworzył pierwszą w Polsce Katedrę Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć, pełnił funkcję dziekana i rektora tej uczelni. Wraz z Jerzym Hoserem zaprojektował budynek laboratorium wysokich napięć na Politechnice Warszawskiej. Jest autorem kompensacyjnej metody pomiaru pola elektrycznego nazwanej metodą Drewnowskiego. Był więźniem obozów koncentracyjnych w Majdanku i w Dachau. Bezpośrednio po wojnie zorganizował dla Polaków Ośrodek Wyższych Studiów w Brukseli. W 1947 wrócił do kraju. Najwybitniejszymi uczniami Profesora byli: Prof. J.L. Jakubowski, Prof. W. Iwaszkiewicz, Prof. J.I. Skowroński, Prof. S. Szpor i Prof. T. Trzetrzewiński. W 1927 wydał pierwszy polski podręcznik z zakresu wysokich napięć „Materiały i układy izolacyjne wysokich napięć”.

Już po jego śmierci, na podstawie jego materiałów, w 1959 ukazała się ponad 600 stronicowa książka „Pomiary Elektryczne” pod redakcją Stanisława Trzetrzewińskiego. W Drewnowie, podlaskiej wsi gdzie znajdował się majątek Drewnowskich, w Oddziale Muzeum Rolnictwa w Ciechanowcu zorganizowano ekspozycję poświęconą życiu i działalności Kazimierza Drewnowskiego [3]

Stanisław Szpor (1908-1981)

Urodził się we Lwowie. Studia na Politechnice Warszawskiej ukończył w 1931, już w 1933 uzyskał stopień doktora nauk technicznych a w 1939 tytuł doktora habilitowanego. W latach 1933-1939 pracował w Fabryce Aparatów Elektrycznych K. Szpotańskiego gdzie m.in. zaprojektował pierwszy polski aparat rentgenowski. Walczył w kampanii wrześniowej. Przedostał się do Francji i został saperem w 2 Dywizji Strzelców Pieszych. Wraz z tą jednostką został internowany w Szwajcarii. W założonym dla polskich żołnierzy Uniwersytecie w Winterthur prowadził wykłady oraz badania naukowe. Po zakończeniu wojny pracował w zwiarcowni firmy Delle w Lyonie. W 1947 został profesorem Politechniki Gdańskiej. Za aktywny udział w wydarzeniach marcowych 1968 roku został odsunięty od wykładania i kierowania Katedrą. Prowadził badania w zakresie ochrony odgromowej i miernictwa wysokonapięciowego. Był promotorem 13 prac doktorskich, autorem ponad 200 publikacji, 30 patentów i kilku podręczników akademickich. W uznaniu zasług „Profesora Profesorów” SEP ogłosił rok 2008 Rokiem Profesora Stanisława Szpora.

Janusz Lech Jakubowski (1905-1997)

Studia na Politechnice Warszawskiej ukończył w 1931 a w doktorat obronił w 1935. Następnie odbył roczny staż naukowy na Politechnice w Akwizgramie u Prof. Rogowskiego. Już w 1935 uzyskał tytuł doktora habilitowanego za pracę *Pomiar wysokich napięć probierczych odkształconych*. W 1945 został Dziekanem Wydziału Elektrycznego. Założył Instytut Elektrotechniki (1946) i Polski Komitet Ochrony Odgromowej.

Był dyrektorem stacji naukowej PAN w Paryżu (1959-1961). i szefem projektu UNESCO w Algierii (1967-1974) i wieloletnim przewodniczącym Komitetu Elektrotechniki PAN. Politechnika Łódzka i Politechnika Warszawska nadały mu tytuł Doktora Honoris Causa. Był promotorem 20 prac doktorskich, autorem ponad 200 publikacji i kilku książek:

Technika wysokich napięć. Trzaska, Evert i Michalski, Warszawa 1951; Piorun Ujarmiony. Wiedza Powszechna 1957; Fale wędrownie w układach energoelektrycznych. PWN 1962,

Podstawy teorii prądu w układach energoelektrycznych, PWN 1968

Jerzy Ignacy Skowroński (1901-1986)

Urodził się w Humaniu na Ukrainie, zmarł we Wrocławiu. Wraz z rodzicami przeniósł się do Warszawy w 1918. Studia na Politechnice Warszawskiej kończy w 1926. Już w 1923 rozpoczął pracę w Katedrze Wysokich Napięć, od 1934 wykłada materiałoznawstwo elektryczne. W 1938 obronił pracę doktorską „O przydatności krajowych szkieł do wyrobu izolatorów liniowych”. W 1945 przyjeżdża na Dolny Śląsk i zostaje dyrektorem Zjednoczenia Energetycznego w Jeleniej Górze. W 1947 został Dziekanem Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej a w następnym roku organizuje Zakład Materiałoznawstwa Elektrycznego jako zamiejscową placówkę Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Zajmował się izolacją napowietrzną, wytrzymałością w olejów i ciekłego azotu. Pod jego kierunkiem zbudowano prototyp kabla kriogenicznego. Był promotorem 18 prac doktorskich. Uzyskał Doktorat Honoris Causa Politechniki Wrocławskiej.



Bolesław Mazurek

Urodził się w Łuszczanowie w 1938. Ukończył studia na Politechnice Wrocławskiej w 1961. Tytuł doktora uzyskał w 1975, a doktora habilitowanego w 1984. W latach 1979–80 i 1985–86 odbył staże naukowe jako „visiting professor” na Uniwersytecie Waterloo i w Zakładach VARIAN w Kanadzie oraz w 1992 na Uniwersytecie Aston w Anglii. Zajmuje się materiałoznawstwem, elektrotechnologią, nadprzewodnictwem i techniką wysokich napięć. Dyrektor Oddziału Instytutu Elektrotechniki we Wrocławiu w latach 1993-2012. Jest inicjatorem i organizatorem cyklicznej konferencji Postępy w Elektrotechnologii. Był promotorem 11 prac doktorskich.

Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji naukowych oraz rozdziału „High voltage vacuum insulation at cryogenic temperatures” w książce Latham R.V. (red) High voltage vacuum insulation. Basic concept and technological practice. Academic Press 1995.



Edward Kuffel

Urodzony w Przysiersku, powiat Świecie w 1924. Podczas wojny został wysłany na roboty przymusowe. W 1944 przedostał się do II Korpusu gen. Andersa i wziął udział w kampanii włoskiej. Studiował fizykę na Uniwersytecie w Dublinie i doktoryzował się na tej uczelni w 1959. Pracował w laboratorium wysokich napięć firmy Meropolitan Vickers Electrical w Manchesterze (1954-1960). Przeniósł się na Uniwersytet w Manchesterze uzyskując tam tytuł profesora. W 1968 objął Katedrę Wysokich Napięć na Uniwersytecie Manitoba w Winnipeg. Był Dziekanem na Uniwersytecie w Windsor i Uniwersytetu Manitoba. Był promotorem 18 prac doktorskich, jest autorem ponad 200 publikacji, jego prace były cytowane ponad 700 razy. Politechnika Poznańska nadała mu tytuł Doktora Honoris Causa w 2009. Bardzo znane są jego podręczniki wysokonapięciowe, w tym ostatni: Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High Voltage Engineering: Fundamentals. Elsevier Newnes 2000.



Stanisław Żołędziowski

Syn płk. dr med. Zygmunta i Jadwigi z Marczewskich, urodzony 30.06.1924 w Warszawie. Był uczniem Gimnazjum Batorego w Warszawie, Szkoły Polskiej w Paryżu (1939-1940) i Edinborough Academy w Szkocji (1941-1942). Brał udział w inwazji Francji z Pierwszą Dywizją Pancerną gen. Maczka. Po Podchorążówce Łączności studiował w Dundee (1945-1948), następnie wrócił do Warszawy. Kontynuował studia, jednocześnie pracując w Instytucie Elektrotechniki. Prześladowania Urzędu Bezpieczeństwa zmusiły rodzinę do pół-legalnego wyjazdu z Polski do Wielkiej Brytanii w 1957 roku. Po 4 latach pracy w fabryce wyłączników A. Reyrolle wykładał przez 23 lat elektroenergetykę na Uniwersytecie Salford w Manchesterze. Po wczesnej emeryturze z tytułem Honourary Senior Lecturer przeniósł się w 1983 do Kanady i zamieszkał w Spruce Grove w prowincji Alberta. Zajmował się diagnostyką izolacji, wytrzymałością powietrza przy długich odstępach, przeskokiem zabrudzeniowym i bezpieczeństwem elektrycznym. Opublikował ponad 60 prac. Do najlepszych należy praca nad mechanizmem przeskoku zabrudzeniowego, która wprowadziła takie podstawowe pojęcia jak: krytyczny prąd, krytyczna długość łuku:

Alston L.L., Zoledziowski S., Growth of discharges on polluted insulation. Proc. IEE, Vol. 110, No. 7, July 1963, pp. 1260-1266. Ostatnio ukazały się jego 3 książki wydane przez Pagemaster of Edmonton: Probabilistic Exact Physics and Secrets of Gravitation, 196 stron, 2009

Updated Gravitation and Physics in the Probability Model of the Digital Universe, 96 stron, 2010

Probabilistic Digital World of Physics and Gravitation with relativistic integer physical constants, 226 stron, 2012.



Ryszard Malewski

Urodził się w Warszawie w 1935. Studia na Politechnice Warszawskiej ukończył w 1958. Pracę doktorską, „Boczniki do pomiaru stromych prądów udarowych” obronił w Instytucie Elektrotechniki w 1967. Był adiunktem na Politechnice Warszawskiej i w Instytucie Elektrotechniki. Pracował w Hydro-Quebec’s Research Institute (IREQ) Varennes dysponującym największym na świecie laboratorium wysokich napięć (1970-1990). Był profesorem Politechniki w Montrealu i Politechniki w Waterloo (Kanada) Założył własną firmę consultingową zajmującą się głównie diagnostyką aparatury wysokonapięciowej. Był przewodniczącym Komitetu IEEE ds. Automatyzacji Systemu Elektroenergetycznego i Pomiarów (1978-1992), przewodniczącym Grupy Roboczej CIGRE 33.03 ds. Prób Wysokonapięciowych (1989-2004) oraz Komisji IEC TC42, WG8 Rejestratory Cyfrowe do Prób Wysokonapięciowych (1978-1999). Wśród licznych nagród i tytułów do najważniejszych należą: Fellow (1981) i Life Fellow (2006) nadane przez IEEE oraz Distinguished Member (2000) nadany przez CIGRE. Habilitował się na Politechnice Warszawskiej w 1991 na podstawie pracy „Metody cyfrowe pomiarów i diagnozowania w technice wysokich napięć”. W 1996 Prezydent RP nadał mu tytuł Profesora Zwyczajnego. Jest autorem lub współautorem ponad 200 publikacji w tym ponad 40 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, współautorem książki „Inżynieria Wysokich Napięć” pod redakcją Hanny Mościckiej-Grzesiak oraz monografii „Transformatory w eksploatacji” pod redakcją Jana Subocza.



Stanisław Grzybowski

Studia na Politechnice Poznańskiej ukończył w 1956. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał na Politechnice Warszawskiej w 1964 a doktora habilitowanego na Politechnice Wrocławskiej w 1984. Pracował na Politechnice Poznańskiej (1956-1987), od 1987 roku jest profesorem Mississippi State University. Odbił 3 staże naukowe na University of Manitoba (1970-1971, 1979, 1985-1986) University of South Carolina (1982-1983) i Instituto de Investigaciones Electricas w Cuernavaca, Meksyk (1981-1982). Zajmuje się głównie procesami starzeniowymi w izolacji elektrycznej, wyładowaniami niezupełnymi i ochroną odgromową. Jest autorem ponad 200 publikacji, 3 książek i 3 skryptów.



Stanisław Gubański

Urodził się w Dzierżoniowie. Ukończył studia na Politechnice Wrocławskiej w 1973 a już w 1976 uzyskał tytuł doktora nauk technicznych. Był asystentem Prof. Ludwika Badiana w Instytucie Podstaw

Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Odbył staż naukowy na University College of North Wales Bangor (1976-1977). Pracował w Royal Institute of Technology w Sztokholmie w latach 1989-1996. Od 1996 jest Profesorem Wysokich Napięć na Chalmers University of Technology w Goeteborgu. Jest edytorem bardzo znanego czasopisma IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Zajmuje się izolacją polimerową i diagnostyką, jest autorem około 300 publikacji.



Edward Gulski

Urodził się w 31.07.1958 w Inowrocławiu. Ukończył studia na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie w 1982 i rozpoczął tam pracę jako asystent Prof. Lemke. W 1987 przeniósł się na Politechnikę w Delft gdzie dokończył pracę doktorską w 1991. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na Politechnice Warszawskiej w 2004. Jest przewodniczącym Grupy Roboczej CIGRE D1.33.03 "PD Measurements" i D1.17 "HV asset condition assessment tools, data quality and experts systems. Jest autorem ponad 350 publikacji 3 książek. Obecnie pracuje w firmie CEO of onsite.hv.solutions AG w Szwajcarii i jest profesorem nadzwyczajnym na Politechnice Poznańskiej.



Aleksander Buliński

Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej w 1976. Był asystentem Prof. Jarosława Juchniewicza. Od 1977 pracuje w National Research Council of Canada. Zajmuje się starzeniem izolacji elektrycznej, diagnostyką i miernictwem wysokonapięciowym. W 2007 otrzymał nagrodę IEEE DEIS Eric O. Forster Award. Jest autorem około 130 publikacji.



Wojciech Kołtunowicz

Urodzony w 1956 w Gliwicach. Pracę doktorską obronił na Politechnice Warszawskiej w 1980. Pracował w Instytucie CESI we Włoszech (1987-2007). Obecnie pracuje w austriackiej firmie OMICRON. Zajmuje się diagnostyką aparatury wysokonapięciowej. Jest członkiem Grup Roboczych CIGRE „Pomiary Wyładowań Niezupelnych” oraz D1.17 "HV asset condition assessment tools, data quality.



Waldemar Ziomek

Ukończył studia na Politechnice Poznańskiej w 1987 a obronił pracę doktorską w 1992. Odbił staże naukowe na University of Strathclyde w Glasgow (1993-1994), na Uniwersytecie w Stuttgarcie w 1995 i na University of Manitoba (1995-1997). Od 1997 Pracuje w firmie Pauwels (włączonej do CG Power Systems Canada Inc) produkującej transformatory a od 2001 również jako adiunkt na University of Manitoba. Zajmuje się izolacją transformatorów, próżniową, gazową oraz wyładowaniami niezupełnymi. Jest autorem ponad 60 publikacji.



Tadeusz Czaszejko

Ukończył Politechnikę Warszawską w 1976 i od 1977 roku pracował na Politechnice Białostockiej. W 1987 rozpoczął pracę na Swinburne University w Melbourne, a od 1991 roku pracuje na Monash University, największym uniwersytecie australijskim, także w Melbourne. W dziedzinie techniki wysokich napięć zajmuje się wyładowaniami niezupełnymi i starzeniem izolacji elektrycznej. W polu jego zainteresowań są również wybrane zagadnienia sieci energetycznych. Jest autorem polskiego patentu oraz skryptów dydaktycznych z teorii obwodów, podstaw maszyn elektrycznych i niezawodności systemów. Pełni rolę współredaktora do spraw materiałów w IEEE Electrical Insulation Magazine. Był promotorem trzech prac doktorskich.

Literatura

- [1] Kołakowski T.E., Michał Doliwo-Dobrowolski patronem roku 2012. Energetyka, nr 1, 2012, s. 9-14
- [2] Szpor S., Prof. Kazimierz Drewnowski. Przegląd Elektrotechniczny nr 7, 1974, s. 317-318
- [3] Osobistość polskiej elektryki. Przegląd Techniczny, nr 45, 2002, s. 25
- [4] Musiał E. (red.) Wielkość i skromność. Pamięci Profesora Stanisława Szpora, Oddział Gdański SEP, 2007
- [5] Jakubowski J.L., Fragmenty autobiografii. Od połowu motyli do badania sztucznych piorunochronów. Kwartalnik Historii Nauki i Techniki, R. 33,1988, nr 3, s. 589-661
- [6] Janusz Lech Jakubowski – twórca „Warszawskiej Szkoły Naukowej Wysokich Napięć. Urządzenia dla Energetyki, nr 4, 2007, s. 87
- [7] Fekecz J., Sulima T., Jerzy Ignacy Skowronski. w: Hickiewicz J. (red.) Polacy zasłużeni dla elektryki. PTETIS, Warszawa 2009
- [8] Słownik biograficzny zasłużonych elektryków wrocławskich, tom 3. SEP Oddział we Wrocławiu 2005
- [9] <http://www.ece.msstate.edu/~stangrzy/>



Jerzy Bogusław Lisiecki, 1925-2008

Urodził się 6.01.1925 r. w Rogowie, woj.kujawsko-pomorskie, powiat Żnin, syn Stanisława i Emilii zd. Basta. Żołnierz Armii Krajowej, ukończył Liceum w Kościanie w 1946.

Studiował na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Elektrycznym od 1946 r. pracując jednocześnie od 1949 na etacie młodszego asystenta. Od października 1950 do listopada 1951 odbył służbę wojskową uzyskując stopień porucznika. W lipcu 1952 obronił pracę magisterską. W latach 1956-1964 pracował na etacie adiunkta a następnie jako starszy wykładowca.

Pełnił funkcję seniora budowy gmachu Wydziału Elektrycznego D-1, projektant Hali Wysokich Napięć. Kierował kompleksową modernizacją Zakładu Wysokich Napięć w latach 1975-1978. Był kierownikiem laboratorium wysokich napięć w latach 1954 – 1990. Opracowane przez niego stanowiska pomiarowe w studenckim laboratorium wysokich napięć oraz instrukcje do ćwiczeń są tylko z małymi zmianami stosowane do dzisiaj. Projektował aparaturę wysokonapięciową, m.in. transformator 160 kV, 300 kVA do prób zabrudzeniowych, transformator 200 kV do diagnostyki ograniczników przepięć, generator DC 2 MV, kondensator wzorcowy 150 kV, izolator przepustowy z żywic lanych dla turbogeneratorsa 64 MVA.

Zbudował w 1959 roku pierwszą w Polsce stację do prób izolatorów w naturalnych warunkach zabrudzeniowych w Wałbrzychu. Konstruował wraz ze Zbigniewem Worobcem liczniki impulsów prądu upływu do oceny narażenia zabrudzeniowego izolatorów. W latach 1960-tych wraz z Bolesławem Mazurkiem zajmował się głowicami kablowymi z żywicy epoksydowej oraz wytrzymałością elektryczną lanych żywic epoksydowych. Wykładał technikę wysokich napięć i ochronę odgromową we Wrocławiu a także w Szkole Inżynierskiej w Zielonej Górze. Zaprojektował instalację piorunochronną obserwatorium meteorologicznego na Śnieżce, zajmował się wykorzystaniem konstrukcji żelbetowych jako uziomów naturalnych i ich odpornością na działanie prądów udarowych.

W latach 1970-1990 współpracował z Zakładami Wytwórczymi Aparatury Rozdzielczej ZWAR i Edwardem Sojda nad optymalizacją konstrukcji odgromników zaworowych. Zaprojektował i zbudował odgromnik 110 kV w osłonie z kauczuku silikonowego, pierwszy tego typu aparat w Polsce. Rozpoczął również pionierskie badania warystorów na bazie tlenku cynku produkowanych przez firmę Pelelectric. W latach 1990-tych zajmował się zagadnieniem kompatybilności elektromagnetycznej oraz kalibracją wysokonapięciowych dzielników napięć. Jego ostatnią pracą wykonaną w 2003 roku była modyfikacja zasilacza 1000 V wykorzystywanego przez doktoranta Adriana Drzazgę.

Autor kilku patentów, współautor 5 skryptów z techniki wysokich napięć i miernictwa wysokonapięciowego, 40 publikacji i ponad 70 raportów i sprawozdań. Współautorami prac Jerzego Lisieckiego było aż 65 osób w tym tak znani uczeni jak Prof. Jerzy Ignacy Skowroński, Prof. Ludwik Badian, Prof. Konstanty Wołkowiński, Prof. Daniel Bem i Prof. Tadeusz Więkowski.

Przeszedł na emeryturę w 1990 jednakże aż do końca 2003 był zatrudniany na 1/3 lub ¼ etatu. Zmarł 31.01.2008, spoczywa na cmentarzu kielczowskim. Pozostawił dwóch synów Romana i Marka, wnuka oraz 3 wnuczki.

O autorze

Krystian Leonard Chrzan

Urodził się w 1955 w Odolanowie, woj. wielkopolskie. Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej ukończył w 1983, doktoryzował się w 1987. W latach 1988-1989 był stypendystą Fundacji Humboldta na Uniwersytecie w Stuttgarcie, prowadząc badania ograniczników przepięć i izolatorów w warunkach zabrudzeniowych. W latach 1991-1993 zajmował się narażeniami izolacji wewnętrznej w Technische Hochschule w Żytawie. W 2004-2005 na kontrakcie na Cardiff University jako Research Associate. Pracował również w laboratoriach wysokonapięciowych Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie (1995), Forschungsgemeinschaft fuer Hochspannung und Hochstromtechnik w Mannheim (1996, 1997, 2002), w Pradze (2001), Darmstadzie (2002), Cottbus (2007), Lwowie (2008), Stellenbosch, RPA (2009), Pekinie i Shenzen (2010), Bangalore (2011). W roku 2000 odbył staż badawczy w Lightning Research Center na Uniwersytecie w Gainesville (Floryda). Prowadzi prace badawcze z zakresu izolacji napowietrznej, ograniczników przepięć i ochrony odgromowej. Jest autorem ponad 230 publikacji, monografii „Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć”, skryptu „High voltage laboratory training” oraz 6 patentów.



elektrotim

9 788571 25225 9



9 788571 25225 9