

# **LABORATORIUM PODSTAW TECHNIKI WYSOKICH NAPIĘĆ**

**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA  
INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH  
ZAKŁAD OBWODÓW I SYGNAŁÓW ELEKTRYCZNYCH**

## **POMIARY WYSOKICH NAPIĘĆ PRZEMIENNYCH ORAZ STAŁYCH.**

### **1. Wstęp**

Próby napięciowe aparatów i urządzeń oraz badania materiałów izolacyjnych wykonywane są przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. W czasie przeprowadzania prób i badań wysokonapięciowych zachodzi konieczność pomiaru wartości skutecznej oraz wartości szczytowej (amplitudy) badanego wysokiego napięcia. Normy [...] wymagają, by pomiar wartości szczytowej i wartości skutecznej był mierzony z niedokładnością nie większą niż  $\pm 3\%$ . Znamionowe napięcie probiercze podawane jest w normie w wartościach skutecznych [...], ale w czasie prób wymaga się pomiaru ich wartości szczytowej. Jest to zrozumiałe, gdyż o wytrzymałości układu izolacyjnego decyduje amplituda napięcia i to od niej zależy przeskok lub przebicie. Wartość skuteczna napięcia odgrywa rolę tylko przy określeniu wytrzymałości napięciowej długotrwałej, gdy przebicie dielektryka ma charakter cieplny. Ponadto pomiar wartości skutecznej napięcia pozwala sprawdzić, czy kształt napięcia nie odbiega od sinusoidy. Gdy napięcie probiercze jest sinusoidalnie zmienne wartość skuteczna  $U_{sk}$  i szczytowa (maksymalna)  $U_m$  są związane współczynnikiem proporcjonalności równym  $\sqrt{2}$ .

$$U_m = \sqrt{2}U_{sk} \quad (1)$$

Według normy [...] stosunek amplitudy sinusoidalnego napięcia probierczego do jego wartości skutecznej nie powinien się różnić od  $\sqrt{2}$  o więcej niż  $\pm 5\%$ .

W praktyce mamy jednak zawsze do czynienia z przebiegiem odkształconym. Stopień odkształcenia od sinusoidy można określić przez podanie współczynnika  $h$  zawartości harmonicznych. Współczynnik zawartości harmonicznych jest to stosunek wartości skutecznej harmonicznych do wartości skutecznej krzywej odkształconej

$$h = \sqrt{\frac{U_3^2 + U_5^2 + \dots}{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}} \quad (2)$$

Zakłada się, że dla wartości współczynnika  $h \leq 5\%$  spełnione jest równanie (1).

W normach zagranicznych podawane jest, że współczynnik  $h$  powinien być nie większy niż 10%.

Do pomiaru wysokiego napięcia przemiennego stosuje się kilka metod pomiarowych. Metody te można podzielić w zależności od sposobu włączenia miernika bądź w zależności od rodzaju mierzonej wartości napięcia (skuteczna lub szczytowa). W zależności od sposobu włączenia miernika metody pomiarowe dzielimy na bezpośrednie lub pośrednie.

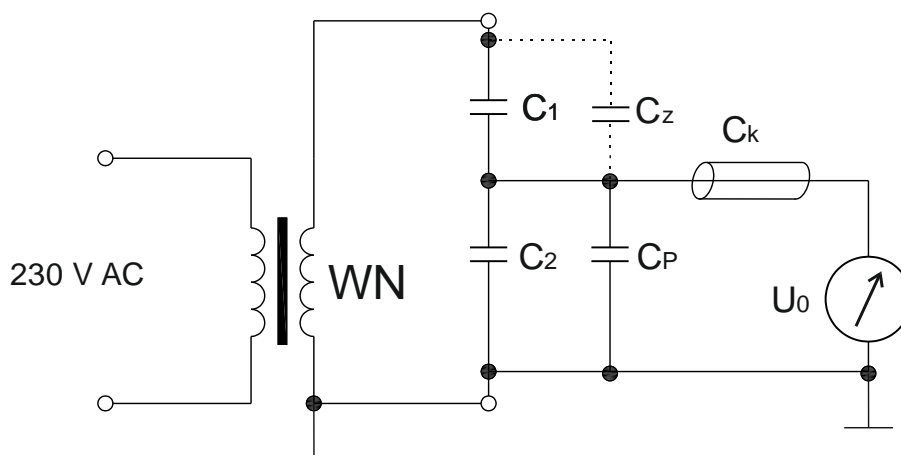
W metodzie bezpośredniej miernik napięcia dołączony jest bezpośrednio do mierzonego napięcia. W ten sposób mierzy się wysokie napięcie za pomocą iskiernika kulowego i woltomierza elektrostatycznego.

W metodzie pośredniej stosuje się mierniki niskonapięciowe. Zachodzi wtedy konieczność obniżenia napięcia do wartości dopuszczalnej dla zastosowanego miernika. Do obniżania mierzonego napięcia stosuje się dzielniki napięcia rezystancyjne lub pojemnościowe oraz przekładniki napięciowe. Wymaganiem warunkiem dla tych urządzeń jest zachowanie proporcjonalności między napięciem mierzonym a napięciem obniżonym.

## 2. Pomiary wysokich napięć

### 2.1. Wysokonapięciowy pojemnościowy dzielnik napięcia

Dzielnik pojemnościowy jest podstawowym przetwornikiem pierwotnym pomiarach wysokich napięć **przemiennych** metodą pośrednią.



Rys.1. Schemat zastępczy dzielnika pojemnościowego wysokiego napięcia

Przekładnia dzielnika, przy zastosowaniu w wysokonapięciowej gałęzi kondensatora ciśnieniowego, wynosi

$$\vartheta = \frac{C_1 + C_2 + C_P + C_k}{C_1} \quad (3)$$

gdzie:  $C_1$ ,  $C_2$  – pojemności wysoko i niskonapięciowej gałęzi dzielnika;  $C_P$  – pojemność pasożytnicza;  $C_k$  – pojemność kabli

Zaletą dzielników pojemnościowych z kondensatorami ciśnieniowymi jest niewrażliwość ich przekładni na oddziaływanie znajdujących się blisko obiektów uziemionych.

W większości przypadków gałąź wysokonapięciowa zbudowana jest z połączonych szeregowo kondensatorów z izolacją syntetyczną nasycana. Przy dużych wartościach wysokich napięć sięgających 3 MV i przy stosunkowo niewielkiej pojemności (250 ÷ 500 pF) dzielnik tworzy wysoką na kilka lub kilkanaście metrów kolumnę. W takim przypadku nie można już pominąć wpływu na przekładnię pojemności pasożytniczych związanych ze znajdującymi się w pobliżu uziemieniami (pojemności doziemne  $C_z$  – około 15 pF). W tym przypadku przekładnia rzeczywista wyniesie

$$\vartheta_{rz} \cong \vartheta \frac{\sin h \sqrt{\frac{C_z}{C_1}}}{\sqrt{\frac{C_z}{C_1}}} \quad (4)$$

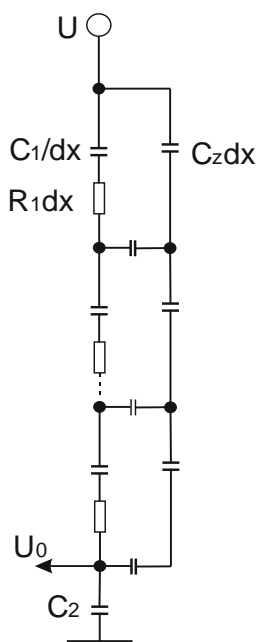
Przy rozwinięciu sinusa hiperbolicznego w szereg i wzięciu pod uwagę tylko dwa pierwsze wyrazy otrzymujemy

$$\vartheta_{zast} \cong \vartheta \left( 1 + \frac{C_z}{6C_1} \right) \quad (5)$$

Wpływ pojemności doziemnych na przekładnię nie byłby taki szkodliwy, gdyby nie oddziaływanie obiektów uziemionych znajdujących się w pobliżu. Zbliżenia takie są nieuniknione ze względu na ograniczone wymiary laboratorium powodując zmianę przekładni dzielnika (przedmioty uziemione zwiększają, a obiekty pod napięciem zmniejszają przekładnię), a tym samym zwiększają błędy pomiarowe. W celu zmniejszenia tego wpływu wymaga się, aby pojemność wysokonapięciowej gałęzi dzielnika była równa 30 ÷ 40 krotnej jego wysokości liczonej w metrach. W takim przypadku wartość stosunku  $\frac{C_z}{6C_1}$  wynosi 6 ÷ 8%.

Istotny wpływ na dokładność pomiaru za pomocą dzielnika pojemnościowego ma ulot. Ładunek przestrzenny z nim związany zmienia rozkład pola elektrycznego w pobliżu zacisku wysokiego napięcia, czyli w miejscu, w którym rozkład napięcia jest najbardziej nierównomierny. W ten sposób przekładnia dzielnika staje się funkcją napięcia mierzonego. Eliminację ulotu można uzyskać, stosując odpowiednie ekrany w postaci pojedynczych toroidów, umieszczonych w pobliżu zacisku wysokiego napięcia. Ekrany zmniejszają nie

tylko maksymalne natężenie pola do wartości mniejszych od krytycznych (ok. 15 kV/cm), ale także zmniejszają wpływ pojemności doziemnych na przekładnię. Prądy dopływające do elementów dzielnika przez pojemności ekranu, kompensują bowiem częściowo prądy odpływające przez pojemności ekranu. Poprawia się więc rozkład napięcia wzdłuż dzielnika, a tym samym ulega pozornemu zmniejszeniu pojemność  $C_z$ . Przy przeskokach i przebiciach w badanych obiektach, izolacja kondensatorów wysokonapięciowej gałęzi dzielnika jest narażona na uszkodzenia. Rozładowanie kondensatorów przez indukcyjność pętli zwarcia jest związane z oscylacjami o dużej częstotliwości i o znacznych wartościach szczytowych. Może to doprowadzić do rozwoju w izolacji kondensatorów wyładowań ślizgowych, których inicjacja zależy od wartości całkowitej zmiany napięcia, a więc od sumy napięć: przeskoku  $U_p$  oraz oscylacji. Dla przeciwdziałania temu zjawisku, często włącza się szeregowo w obwód dzielnika rezystory tłumiące o wartości kilkuset omów, rozłożone równomiernie wzdłuż gałęzi wysokonapięciowej (zapewnia to równomierny rozkład napięcia na rezystorach w chwili rozładowania).



Rys.2. Schemat zastępczy dzielnika pojemnościowego wyposażonego w rezystory tłumiące.

Istotny wpływ na dokładność pomiaru ma obciążenie niskonapięciowej gałęzi dzielnika przez miernik. Błąd przekładni w takim przypadku ocenia się z następującej zależności

$$\delta_{o\%} \approx \frac{1}{2\omega^2 R_0^2 C_0^2} \cdot 100\% \quad (6)$$

Wymagana stała czasowa (w sekundach) dolnej gałęzi dzielnika, obciążonej rezystancją wejściową  $R_0$  miernika, powinna spełniać nierówność

$$R_0 C_0 \geq \frac{0,0225}{k\sqrt{\delta_{0\%}}} \quad (7)$$

## 2.2. Wysokonapięciowy woltomierz elektrostatyczny

Wysokonapięciowe woltomierze elektrostatyczne umożliwiają pomiar wartości skutecznej **przemiennej sinusoidalnie napięcia**. Zasada działania taki woltomierzy oparta jest na wykorzystaniu sił działających między dwoma elektrodami umieszczonymi w polu elektrostatycznym związanym z mierzonym wysokim napięciem. Siła wzajemnego oddziaływania elektrod jest proporcjonalna do kwadratu napięcia nimi i określa ją następująca zależność

$$F = \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} C U^2 \right) = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{S}{a^2} U^2 \quad (8)$$

gdzie:

$U$  – napięcie mierzone [V],

$C$  – pojemność międzyelektrodowa [F],

$\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  [F/m],

$S$  – powierzchnia elektrody pomiarowej [ $m^2$ ],

$a$  – odstęp między elektrodami [m].

W praktyce laboratoryjnej stosuje się woltomierze elektrostatyczne techniczne, umożliwiające bezpośredni odczyt wartości skutecznej mierzonego napięcia. Moment zwrotny jest uzyskiwany za pomocą sprężystej nici. W związku z tym położenie elektrody ruchomej względem nieruchomej zależy od wartości mierzonego napięcia, a więc siła  $F$  wynosi

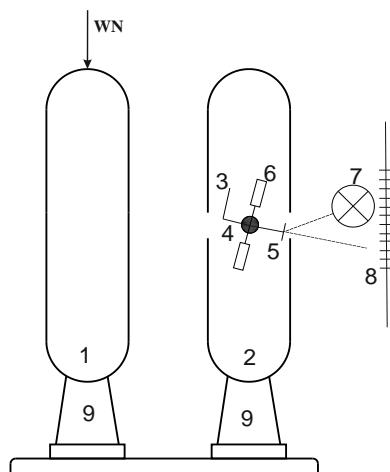
$$|F| = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{dx} \quad (9)$$

Jeżeli moment napędowy zostanie zrównoważony przez moment zwrotny  $M = D\alpha$  to kąt wychylenia organu ruchomego wynosi

$$\alpha = K \cdot U^2 \frac{dC}{dx} \quad (10)$$

$k$  – współczynnik proporcjonalności.

Woltomierze techniczne do pomiaru wysokich napięć są budowane najczęściej w klasach 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 i na napięcia do 300 kV. Przykład budowy takiego woltomierza pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Schemat budowy wysokonapięciowego woltomierza elektrostatycznego technicznego: 1, 2-elektrody; 3-blaszka; 4-sprężysta nić; 5-zwierciadło; 6-tłumiki; 7-źródło światła; 8-podziałka; 9-izolatory.

Napięcie mierzone doprowadza się do elektrody 1 i 2. W elektrodzie 2 jest wycięte okienko, w którym została umieszczona cienka blaszka, stanowiąca właściwa elektrodę ruchomą (elektroda 2 spełnia rolę ruchomego ekranu). Blaszka jest połączona sztywno z dwoma tłumikami i zwierciadłem. Całość może się obracać na sprężystej nici. W stanie beznapięciowym blaszka przysłania tylko częściowo okienko. Pod wpływem pola elektrostatycznego blaszka obraca się, pokonując opór sprężystej nici. Zmianę zakresu mierzonego napięcia uzyskuje się przez zmianę odstępów elektrod 1 i 2.

Podstawowe zalety woltomierzy elektrostatycznych to:

- a) duża dokładność w szerokim zakresie częstotliwości (do 0,5% do kilku MHz),
- b) mała pojemność wejściowa (do  $2 \div 10$  pF),
- c) bardzo duża rezystancja wejściowa (do  $10^{13} \Omega$ ),

Woltomierze elektrostatyczne stosowane są do pomiaru stosowane do pomiaru napięć obiektów o małej pojemności, gdyż nie zmieniają rozkładu napięcia w obwodzie probierczym. Duża rezystancja wejściowa umożliwia pomiar napięcia w obwodach napięcia stałego bardzo małych mocy.

Przyczyną znaczących błędów wskazań woltomierzy elektrostatycznych jest gromadzenie ładunku elektrostatycznego na powierzchniach dielektryków, stanowiących elementy układu izolacyjnego miernika. Może on oddziaływać na

elektrodę ruchomą, powodując niewłaściwe wskazania. Wpływ ten jest tym silniejszy im większy jest odstęp elektrod 1 i 2. Można go zmniejszyć przez zastosowanie - jako elementów izolacyjnych – dielektryków mniej podatnych na gromadzenie powierzchniowe ładunku. Dobre wyniki daje również stosowanie specjalnych ekranów osłaniających te części izolacyjne, na których może gromadzić się ładunek. Przyczyną błędów może być również oddziaływanie obcych pól elektrycznych. Przy pracy woltomierza w układzie niesymetrycznym może mieć także wpływ biegunowość mierzonego napięcia. Innym źródłem niedokładności może być ulot lub przy napięciu przemiennym wyładowania powierzchniowe (ślizgowe) na izolatorach.

Dla wielu woltomierzy elektrostatycznych znamionowe napięcie pracy oznacza najwyższą wartość napięcia stałego, jaką można pomierzyć za pomocą tego miernika. W takim przypadku granicę wartości mierzonych napięć przemiennych należy obniżyć o  $\sqrt{2}$  razy. Trzeba bowiem uwzględnić fakt przyłożenia do układu izolacyjnego woltomierza wartości maksymalnej napięcia mierzonego.

### 2.3. Iskiernik kulowy

Iskiernik kulowy jest jednym z najprostszych, a jednocześnie uniwersalnym przyrządem pomiarowym. Można nim bowiem mierzyć **wartość szczytową napięcia przemiennego, stałego, piorunowego oraz łączeniowego**. Do jego zalet należy zaliczyć:

- a) duży zakres pomiarowy (do kilku MV),
- b) wyraźna granica przeskoku nie poprzedzona innymi formami wyładowań,
- c) duża powtarzalność wyników, co jest związane z małym statystycznym rozrzutem.

Wadami pomiarów wysokonapięciowych są:

- a) punktowy pomiar (nieciągły),
- b) niewielka dokładność,
- c) ucięcie napięcia i konieczność wyłączenia układu probierczego przy napięciu przemiennym,

Pomiarowy iskiernik kulowy składa się dwóch kul o tej samej średnicy, wykonanych najczęściej z miedzi lub mosiądzu (do średnicy 6,25 mm – pełne). Są one osadzone w układzie pionowym lub poziomym na metalowych sworzniach. Maksymalna średnica kul wynosi 250 milimetrów. Pomiaru można dokonywać dwoma metodami:

- a) podnosząc napięcie przy stałym odstępnie elektrod,
- b) zmniejszając odstęp elektrod przy ustalonej wartości napięcia.

W celu zmniejszenia błędu wynikającego ze statystycznego charakteru wyładowania wykonuje się nie mniej niż 5 pomiarów, przyjmując jako wynik wartość średnią.

Wartość napięcia przeskoku iskiernika zależy od:

- a) odstepu elektrod,
- b) rodzaju mierzonego napięcia (stałe, przemienne, udarowe, łączeniowe),
- c) biegunowości mierzonego napięcia,
- d) ciśnienia i temperatury otaczającego powietrza.

Wpływ wilgotności w zakresie  $4 \div 15 \text{ g/m}^3$  jest pomijalny. Wilgotność względna nie powinna jednak przekraczać 90%, by nie dopuścić do kondensacji pary wodnej na elektrodach, co zmniejsza dokładność pomiaru.

Napięcia przeskoku  $U_p$  zostały stabilizowane dla znormalizowanych warunków atmosferycznych (ciśnienie 1013 hPa, temperatura 293 K i wilgotność  $11 \text{ g/m}^3$ ). Jeżeli pomiar został wykonany w innych warunkach można je także obliczyć wprowadzając współczynnik korekcyjny  $k$ , przez który mnożymy podaną w tabelicy wartość  $U_{pn}$

$$U_p = k \cdot U_{pn} \quad (11)$$

Współczynnik korekcyjny  $k$  uzależniony jest od względnej gęstości powietrza  $\delta$  zależnością

$$\delta = \frac{b}{101,3} \cdot \frac{293}{T} \quad (12)$$

gdzie:

$b$  – ciśnienie powietrza w [hPa],

$T$  – temperatura otoczenia [K],

Tabela 1. Zależność współczynnika  $k$  od względnej gęstości powietrza  $\delta$

$\delta$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15
$k$	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,0	1,05	1,09	1,13

Dokładność pomiaru iskiernikiem kulowym wynosi  $\pm 3\%$  przy odstępach elektrod  $a \leq 0,5D$  i  $\pm 5\%$  przy  $a \leq 0,8D$ ,  $D$  – średnica kul.



Ponieważ wartość współczynnika  $k$  jest bliska wartości  $\delta$ , w praktyce nie wyznacza się wartości  $k$ , lecz rzeczywistą wartość napięcia  $U_p$  – ze wzoru

$$U_p = \delta \cdot U_{pn} \quad (13)$$

W celu zapewnienia maksymalnej dokładności pomiaru niezbędne jest zapewnienie kulistego kształtu i czystości elektrod iskiernika. Do pomiarów należy dobierać iskierniki o średnicach, które - przy największej wartości mierzonego napięcia - spełniają warunek

$$\frac{a}{d} < 0,5 \quad (14)$$

gdzie:

a – odstęp między kulami [mm],

b – średnica kul [mm].

Przy większych odległościach  $a$  między kulami zniekształcenie pola, wywołane wpływem sąsiadujących z iskiernikiem przedmiotów, może być przyczyną dużych błędów pomiarowych.

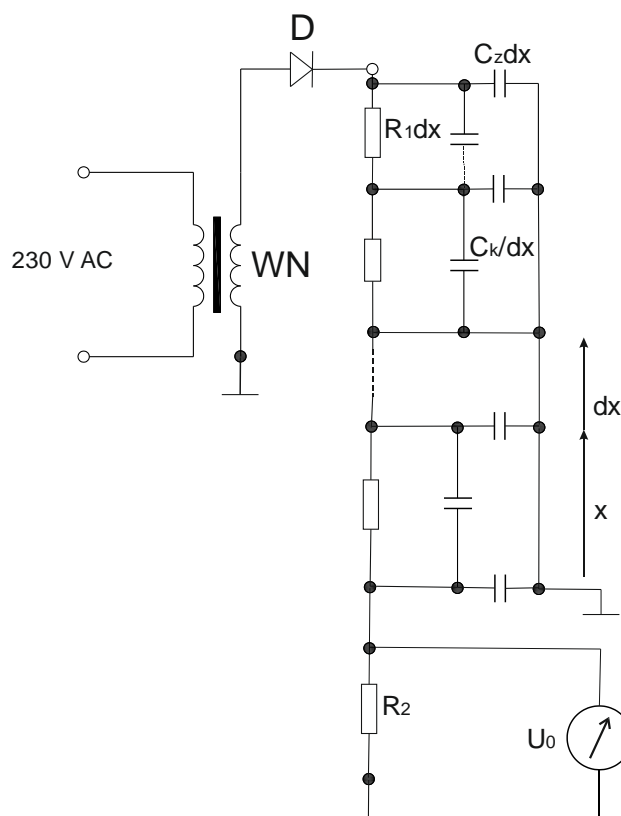
Przy pomiarze napięcia stałego oraz przemiennego 50 Hz zalecane jest łączenie iskiernika przez rezystor. Zadaniem rezystora jest ograniczenie prądu płynącego przez iskiernik w chwili przeskoku oraz tłumienie drgań mogących powstać w układzie probierczym, szczególnie przy nagłym ucięciu napięcia. Wartość rezystancji ograniczającej przyjmuje się w zależności od największej wartości mierzonego napięcia. Wartość rezystancji ograniczającej przyjmuje się w zależności od największej wartości mierzonego napięcia. Wynosi ona  $25/d$  [k $\Omega$ ] na 1 kV szczytowej wartości mierzonej ( $d$  - średnica kul w cm) dla kul o średnicach do 25 cm, a przy większych kulach wynosi ona 1 k $\Omega$  na 1 kV tej mierzonej wartości napięcia.

Pewne problemy stwarza pomiar napięć przemiennych o częstotliwości wyższej niż 50 Hz. Od  $f = 20$  kHz obserwuje się wyraźny spadek napięcia przeskoku wraz ze wzrostem częstotliwości. Może to być wpływem pozostającego w przerwie iskrowej części ładunku dodatniego, wytworzonego w poprzednim półokresie. Przy 1 MHz niedokładności pomiaru może sięgać od 10 do 20%, w zależności od odstępu kul iskiernika.

## 2.4. Dzielniki i oporniki szeregowo

Dzielniki i oporniki szeregowo o dużych i bardzo dużych rezystancjach są stosowane głównie do pomiaru **wysokich napięć stałych** metodami pośrednimi. Przekładnia dzielnika wynosząca

$$\vartheta = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (15)$$



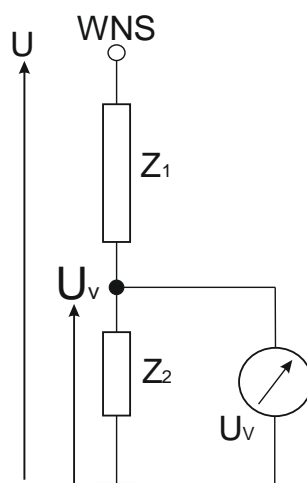
Rys. 4. Schemat dzielnika rezystancyjnego do pomiaru wysokich napięć:  $R_1$ ,  $R_2$  – rezystancje wysoko i niskonapięciowe;  $C_z$  - pasożytnicze pojemności doziemne;  $C_k$  – pojemności wzdluzne.

Powinna być wyznaczana z dokładnością nie mniejszą niż 1%. [...] Należy przy tym uwzględnić rezystancję wejściową miernika. Dla zapewnienia wymaganej dokładności pomiaru, dzielnik powinien charakteryzować się stałością przekładni w całym zakresie mierzonego napięcia. Zmiany przekładni mogą być spowodowane przez:

- a) ulot w gałęzi wysokonapięciowej,

- b) upływ prądu przez izolację,
- c) Zmianę rezystancji wskutek nadmiernego nagrzewania,
- d) Starzenia oporników.

Wpływ ulotu eliminuje się przez zastosowanie odpowiednich ekranów umieszczając gałąź wysokonapięciową dzielnika w oleju izolacyjnym. Upływ prądu przez izolację dzielnika może być spowodowany dużą konduktywnością materiału użytego na konstrukcję wsporczą dzielnika oraz wyładowaniami powierzchniowymi, jeżeli natężenie pola elektrycznego przekroczy wartość krytyczną. W przypadku pierwszym – prąd przewodnościowy można zmniejszyć do pożądanej wartości, wykonując konstrukcję dzielnika z materiału o dużej rezystywności zarówno skrośnej jak i powierzchniowej. Wyładowań powierzchniowych można uniknąć, jeżeli natężenie pola nie przekracza 5 kV/cm w powietrzu i 15 kV/cm w oleju izolacyjnym. Dzielniki rezystancyjne do pomiaru wysokich napięć stałych wykonuje się najczęściej z warstwowych rezystorów metalizowanych o dużej stabilności rezystancji. Rezystancja gałęzi wysokonapięciowej jest na ogół bardzo duża w celu uniknięcia zbytniego obciążenia źródła mierzonego napięcia i nadmiernego nagrzewania dzielnika. Nie dopuszcza się tym samym do znaczącego spadku napięcia i zwiększenia pulsacji w układzie probierczym.



Rys. 5. Dzielnik rezystancyjny z podłączonym woltmierzem elektrostatycznym

$$U = U_v \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \quad (17)$$

Zmienność przekładni od częstotliwości napięcia jest związana z istnieniem sprzężeń pojemnościowych między elementami dzielnika a ziemią, których wartość nie jest stała, lecz zależy od częstotliwości.

## 2.5. Przekładnik napięciowy

Przekładnik napięciowy posiada uzwojenie pierwotne przyłączone równolegle do układu kontrolowanego oraz uzwojenie wtórne, do którego zacisków przyłączone są odbiorniki o bardzo dużych impedancjach jak woltomierze, cewki napięciowe woltomierzy czy liczniki i przekaźniki. Przekładnik napięciowy nazywany jest transformatorem pracującym w warunkach zbliżonych do stanu jałowego transformatora. W układach pomiarowych spełniają one następujące zadania: [14]

- umożliwiają pomiary za pomocą mierników o niewielkim zakresie;
- oddzielają galwanicznie przyrządy od obwodu kontrolowanego;
- umożliwiają umieszczenie przyrządów w dużej odległości od obwodu kontrolowanego, dzięki temu można zminimalizować wpływ pola magnetycznego danego obwodu.

Przekładnię przekładnika napięciowego obliczamy z następującego wzoru

$$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2}$$

gdzie:

$\vartheta_{un}$  – przekładnia znamionowa przekładnika napięciowego

$U_{1n}$  - napięcie pierwotne

$U_{2n}$  - napięcie wtórne

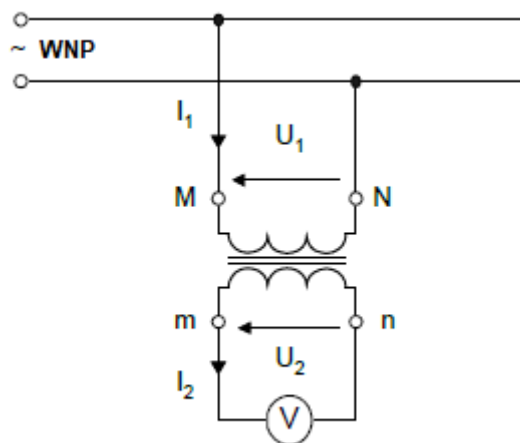
Napięcia pierwotne i wtórne są objęte normalizacją. Aktualna norma Norma PN-EN 61869-4:2014-09 obejmuje wykaz takich napięć

Tabela 2. Znormalizowane wartości napięcia pierwotnego i wtórnego zgodne z normą Norma PN-EN 61869-4:2014-09

Napięcie pierwotne [kV]	Napięcie wtórne [V]
3, 6, 10, 20, 40, 60, 110, 220, 400	100

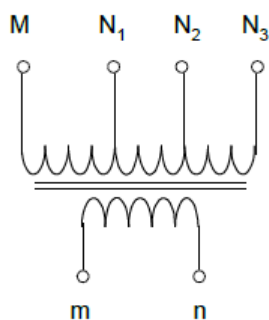
Należy jednak pamiętać, że jeżeli przekładnik jest przeznaczony do stałej pracy w układzie gwiazdowym, to napięcie znamionowe podane na tabliczce znamionowej przekładnika jest równe wartości podanej w Tab. 2 podzielonym przez  $\sqrt{3}$ .

Oznaczenia zacisków przekładników napięciowych są znormalizowane. Zaciski uzwojenia pierwotnego oznacza się dużymi literami M i N (dawnej A i B), są one tak oznaczone, że w chwili, gdy potencjał punktu M jest wyższy niż potencjał punktu N, to również potencjał punktu m jest wyższy od potencjału punktu n. Poniżej (Rys.1.6.) widzimy przykładowy schemat przekładnika napięciowego obciążonego woltomierzem.



Rys.6. Schemat przekładnika napięciowego z oznaczonymi zaciskami uzwojeń.

Oznacza to, że w chwili, gdy prąd w uzwojeniu pierwotnym płynie od M do N, to w uzwojeniu wtórnym prąd płynie od n do m. Jeżeli przekładnik posiada zaczepty po stronie pierwotnej, to zaciski pierwotne należy oznaczać  $M_1, N_1, M_2, N_2$  itd. lub przy zaciskach N podawać indeks oznaczający napięcie na jakie uzwojenie to jest przystosowane. W podobny sposób oznacza się zaczepty strony wtórnej.



Rys. 7. Schemat przekładnika napięciowego z zaczeptami po stronie pierwotnej

Pomiar napięcia przekładnikiem napięciowym obarczony jest j błędem napięciowym względnym. Błąd ten jest różnicą między napięciem wtórnym  $U_2$  pomnożonym przez przekładnię znamionową  $\vartheta_{un}$ , a napięciem pierwotnym  $U_1$

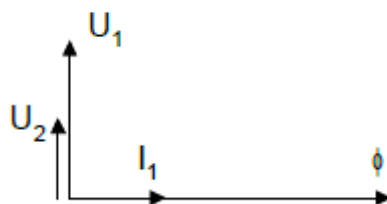
wyrażonym w procentach napięcia pierwotnego.

$$\vartheta_u = \frac{\vartheta_{un} + U_2 - U_1}{U_1}$$

Błąd napięciowy zazwyczaj podaje się w procentach

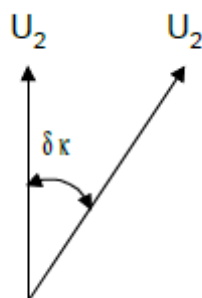
$$\delta_{u\%} = \frac{\vartheta_{un} + U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{\vartheta_{un} + \vartheta_u}{\vartheta_u} \cdot 100\%$$

W idealnym przekładniku napięciowym przy pracy jałowej kąt pomiędzy napięciem pierwotnym i wtórnym wynosi  $0^\circ$ . Natomiast wykres wskazowy idealnego przekładnika przedstawiony jest na poniższym wykresie (Rys. 7.).



Rys.7. Wykres wskazowy idealnego przekładnika napięciowego

Kolejnym błędem jaki można wyróżnić jest to błąd kątowy przekładnika napięciowego. Błąd ten wyrażony jest w minutach pomiędzy wskazem napięcia wtórnego a wskazem napięcia pierwotnego (Rys. 8.) Dodatni znak błędu kątowego oznacza, że wskaz napięcia wtórnego wyprzedza wskaz napięcia pierwotnego.



Rys. 8. Błąd kątowy przekładnika

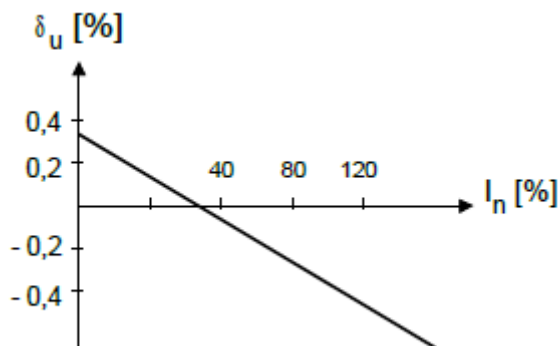
Ze względu na błędy pomiarowe przekładniki napięciowe dzielą się na klasy dokładności. Normy ustalają cztery normalne klasy dokładnościowe przekładników napięciowych: 0.2, 0.5, 1 i 3. Natomiast w Polsce mamy również

przekładniki klasy laboratoryjnej, a dokładniej są trzy takie klasy: 0.02, 0.05 oraz 1. Ich błędy graniczne są dziesięciokrotnie mniejsze od odpowiednich błędów przekładników klas normalnych. W poniższej tabeli (Tab. 3.) przedstawiłem klasy dokładności i błędy graniczne przy określonym obciążeniu zgodnie z aktualnymi normami (PN-EN 61869-4:2014-09). Należy jednak pamiętać, że jeżeli 25% mocy znamionowej jest większe niż 15 VA, to dopuszczalne błędy nie mogą być większe od dopuszczalnych przy obciążeniu obwodu wtórnego od 15 VA do 100 % mocy znamionowej.

Tab. 3. Wartości napięcia pierwotnego i wtórnego zgodne z normą [12]

Klasa dokładności	Napięcie pierwotne w % obciążenia znamionowego	Obciążenie wtórne przy $U=U_N$ w % mocy znamionowej	Dopuszczalne błędy przy $f_N$ i przy $\cos \varphi = 0.8$ ind. obwodu wtórnego	
			Błąd napięciowy $\delta_U$ (%)	Błąd kątowy $\delta_K$ (min)
3	100	50-100	3	-
1	80-120	25-100	1	40
0.5	80-120	25-100	0.5	20
0.2	80-120	25-100	0.2	10

Moc znamionowa przekładnika napięciowego to moc, którą przekładnik może dostarczyć do obwodu wtórnego przy napięciu znamionowym, przy której błędy przekładnika nie przekraczają wartości dopuszczalnych w danej klasie przekładnika.



Rys. 9. Zmiana błędu napięciowego  $\delta_u$  przekładnika napięciowego w zależności od obciążenia uzwojenia wtórnego.

Moce znamionowe przekładników napięciowych są znormalizowane i wynoszą od 15 VA (przy napięciu znamionowym izolacji 3 - 6 kV) do 180 VA (przy napięciu znamionowym izolacji 110 - 400 kV).

Zmiana obciążenia przekładnika napięciowego powoduje zmianę przekładni, a tym samym zmianę błędów napięciowych i kątowych.

# PROTOKÓŁ POMIAROWY

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

LABORATORIUM PODSTAW TECHNIKI WYSOKICH NAPIĘĆ			
Gr.		Numer ćwiczenia	
Lp.	Nazwisko i imię	Data wykonania ćwiczenia	
1.	.....	Prowadzący ćwiczenie	
2.	.....		
3.	.....	Podpis	
4.	.....		
5.	.....	Data wykonania ćwiczenia	
Temat	<b>Pomiary wysokich napięć przemiennych oraz stałych.</b>		



## 1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z metodami pomiarów wysokich napięć stałych, przemiennych (50 Hz) i udarowych oraz aparaturą pomiarową.

## 2. Sposób przeprowadzenia pomiarów

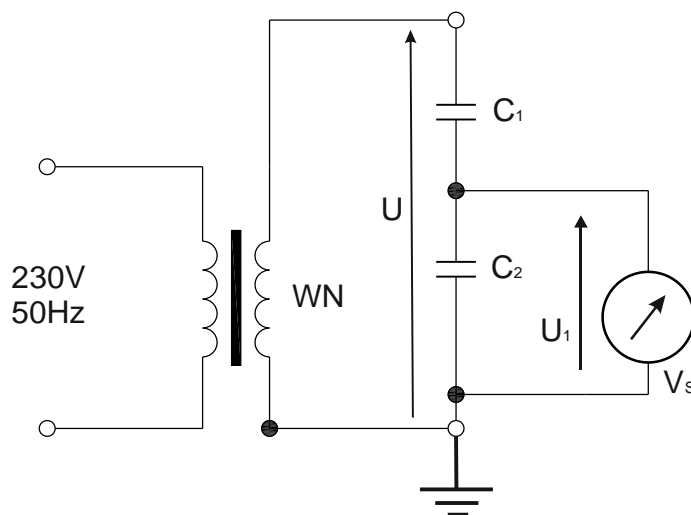
Warunki atmosferyczne:

- Temperatura otoczenia:  $T = \dots\dots\dots$  °C
- Ciśnienie atmosferyczne:  $b = \dots\dots\dots$  hPa
- Wilgotność względna powietrza:  $h = \dots\dots\dots$  %

### 2.1. Pomiary wysokich napięć przemiennych

#### 2.1.1. Pomiar wysokich napięć przemiennych metodą dzielnika pojemnościowego

Pomiar wysokich napięć metodą dzielnika pojemnościowego wykonujemy w układzie jak na rysunku 3 przyłączając do zacisków na pulpicie sterowniczym niskonapięciową część dzielnika pojemnościowego z woltomierzem elektrostatycznym  $V_s$  (pojemności dzielnika wynoszą odpowiednio  $C_1 = 60$  pF,  $C_2 = 30$  pF). Pomiarów dokonuje się dla wartości napięć z transformatora WN podanych w tabeli 1. Pomiary przeprowadzić przy narastającym oraz malejącym napięciu źródła.



Rys. 1. Układ pomiarowy do metody dzielnika pojemnościowego.

Tabela 1

Dzielnik pojemnościowy					
Lp.	U	U <sub>V</sub>	ϑ <sub>pom</sub>	ϑ <sub>teor</sub>	U <sub>1</sub>
n	kV	kV	-	-	kV
1	5				
2	8				
3	10				
4	12				
5	15				
6	20				

Objaśnienia:

U – napięcie źródła [kV],  
 U<sub>1</sub> – napięcie wyznaczone z dzielnika [kV],  
 U<sub>V</sub> – napięcie na woltomierzu kV],  
 ϑ<sub>pom</sub> – przekładnia dzielnika z pomiarów,  
 ϑ<sub>teor</sub> – przekładnia dzielnika teoretyczna,  
 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – kondensatory w dzielniku [μF].

Tabela 2.

Dzielnik pojemnościowy					
Lp.	U	U <sub>V</sub>	ϑ <sub>pom</sub>	ϑ <sub>teor</sub>	U <sub>1</sub>
n	kV	kV	-	-	kV
1	20				
2	16				
3	12				
4	10				
5	8				
6	5				

$$\vartheta_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

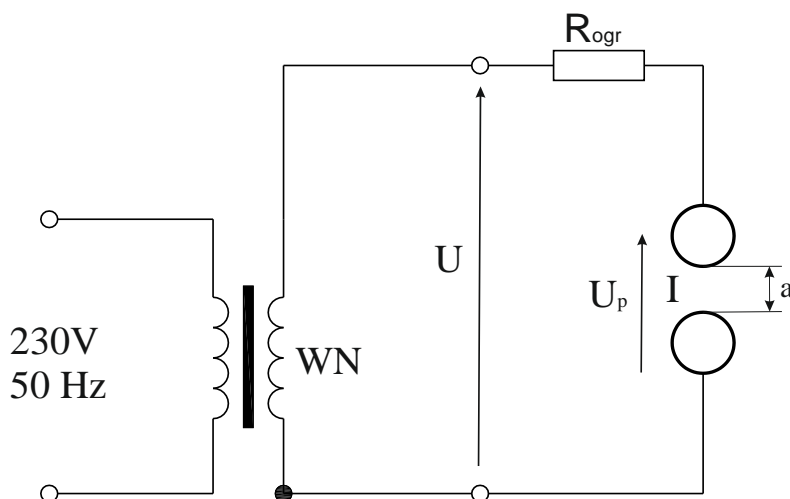
$$U_1 = \vartheta_C \cdot \sqrt{2} \cdot U_V$$

Opracowanie wyników:

1. Wyznaczyć przekładnię dzielnika pojemnościowego ϑ<sub>pom</sub>, ϑ<sub>teor</sub>;
2. Obliczyć wartość U<sub>1</sub> = f(ϑ<sub>pom</sub>, ϑ<sub>teor</sub>, U<sub>V</sub>);
3. Wyznaczyć charakterystykę U, U<sub>1</sub> = f(k) w kolejnych punktach pomiarowych;
4. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami.

### 2.1.2. Pomiar wysokich napięć przemiennych metodą iskiernika kulowego

Pomiar wysokich napięć metodą iskiernika kulowego wykonujemy w układzie jak na rysunku 2. Do transformatora wysokiego napięcia *TWN* dołączamy iskiernik kulowy o średnicy kul  $D = 12,5 \text{ cm}$ , a następnie za pomocą konsoli sterowniczej *TP* ustawiamy wartości napięć podanych w tabeli 1. Następnie zmieniając odległości między kulami iskiernika należy zwiększać napięcie  $U$  do momentu zauważenia przeskoku iskry między kulami. Z woltomierza na konsoli sterowniczej należy odczytać wartość napięcia, przy którym zauważono przeskok iskry. Dla każdej odległości  $a$  kul należy trzykrotnie doprowadzić do przeskoku iskry. Wyniki zarejestrowanego napięcia przeskoku pomiędzy kulami iskiernika zapisujemy w tabeli 2. Wyniki należy porównać ze znormalizowanymi odległościami kul i odpowiadającym im znormalizowanym wartościom napięć.



Rys. 2. Schemat pomiaru wysokiego napięcia metodą iskiernikową.

$\delta$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15
$k$	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,0	1,05	1,09	1,13

$k = f(\delta)$  – współczynnik korekcji

$$\delta = \frac{b}{101,3} \cdot \frac{293}{T}$$

$$U_p = U_2 = k \cdot U_{pn \text{ } \acute{s}r}$$

Tabela 3.

Iskiernik kulowy D=12,5 cm				
a	$U_{znorm}$	$U_{pn}$	$U_{pn\ \acute{s}r}$	$U_2$
cm	kV	kV	kV	kV
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				
1				

Objaśnienia:

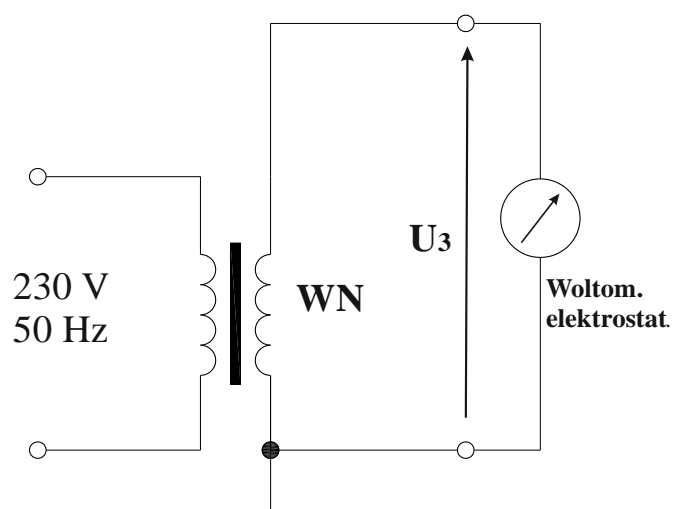
 $U_{znorm}$  – znormalizowane napięcie przeskoku [kV], $U_{pn}$  – zmierzone napięcie przeskoku [kV], $U_{ps\ \acute{s}r}$  – średnia arytmetyczna wartość napięcia przeskoku kV], $U_2$  – obliczone napięcie przeskoku po korekcji

Opracowanie wyników:

2. Sprawdzić i wpisać odpowiednie znormalizowane wartości napięć przeskoku [kV];
3. Obliczyć średnią arytmetyczną wartość napięcia przeskoku [kV];
4. Obliczyć napięcie przeskoku po korekcji [kV]
5. Wyznaczyć charakterystykę  $U_{znorm}$ ,  $U_2 = f(n)$  w kolejnych punktach pomiarowych;
6. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami.

## 2.4. Pomiar wysokich napięć przemiennych woltomierzem elektrostatycznym

Układ pomiarowy:



Rys. 3. Schemat pomiaru wysokiego napięcia.

Tabela 4.

<b>Woltomierz elektrostatyczny</b>		
$U_{zn}$	$U_{Vzm}$	$U_3$
kV	kV	kV
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

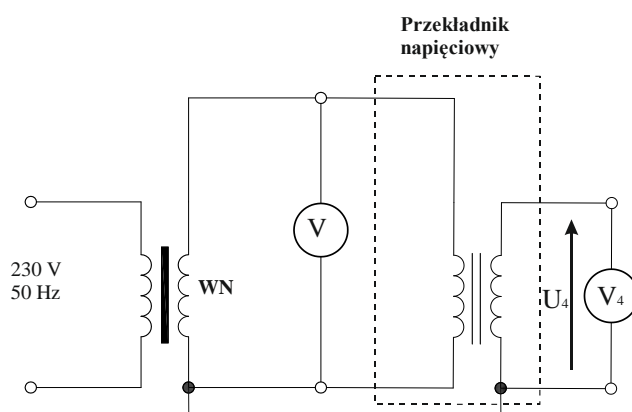
$$U_3 = \sqrt{2} \cdot U_{Vzm}$$

Opracowanie wyników:

1. Obliczyć wartość szczytowa napięcia  $U$  [kV];
2. Wyznaczyć charakterystykę  $U$ ,  $U_3 = f(n)$ , dla kolejnych pomiarów.;
3. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami.

## 2.5. Pomiar wysokich napięć przemiennych przekładnikiem napięciowym.

Schemat pomiarowy:



Rys. 4. Schemat pomiaru wysokiego napięcia przemiennego przez przekładnik napięciowy.

Tabela 5

Lp.	$U$	$U_{PU}$	$\vartheta_{pom}$	$U_4$
n	[kV]	[kV]		[kV]

$U_{PU}$  – nap. na wyjściu przekładnika [kV]  
 $U_4$  – nap. po korekcji przekładniowej [kV]

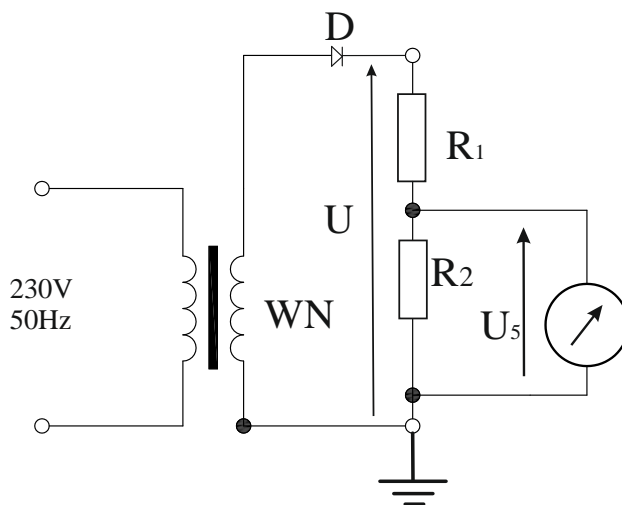
Opracowanie wyników:

1. Obliczyć przekładnię napięciową przekładnika;
2. Obliczyć napięcie po korekcji napięciowej;
3. Wyznaczyć charakterystykę  $U$ ,  $U_4 = f(n)$ ;
4. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami

## 2.2. Pomiary wysokich napięć stałych

### 2.2.1. Pomiar wysokich napięć przemiennych metodą dzielnika rezystancyjnego

Schemat pomiarowy:



Rys. 5. Schemat pomiaru wysokiego napięcia stałego przez rezystancyjny dzielnik napięcia.

Tabela 6

Dzielnik rezystancyjny					
Lp.	U	$U_V$	$\vartheta_{pom}$	$\vartheta_{teor}$	$U_5$
n	kV	kV	-	-	kV
1	5				
2	8				
3	10				
4	12				
5	15				
6	20				

Objaśnienia:

U – napięcie źródła [kV],  
 $U_5$  – napięcie wyznaczone z dzielnika [kV],  
 $U_V$  – napięcie na woltomierzu kV],  
 $\vartheta_{pom}$  – przekładnia dzielnika z pomiarów,  
 $\vartheta_{teor}$  – przekładnia dzielnika teoretyczna,  
 $R_1, R_2$  – rezystory w dzielniku [k $\Omega$ ].

Tabela 7.

Dzielnik rezystancyjny					
Lp.	U	$U_V$	$\vartheta_{pom}$	$\vartheta_{teor}$	$U_5$
n	kV	kV	-	-	kV
1	20				
2	16				
3	12				

4	10				
5	8				
6	5				

$$\vartheta_R = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

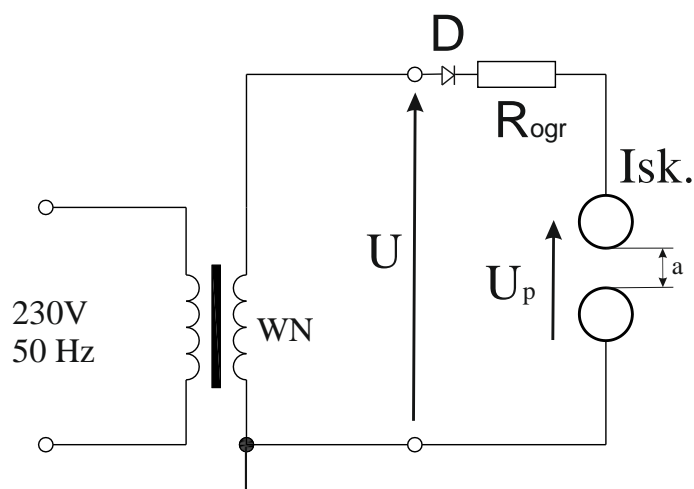
$$U_5 = \vartheta_R \cdot \sqrt{2} \cdot U_V$$

Opracowanie wyników:

1. Wyznaczyć przekładnię dzielnika rezystancyjnego  $\vartheta_{\text{pom}}$ ,  $\vartheta_{\text{teor}}$ ;
2. Obliczyć wartość  $U_1 = f(\vartheta_{\text{pom}}, \vartheta_{\text{teor}}, U_P)$ ;
3. Wyznaczyć charakterystykę  $U$ ,  $U_5 = f(k)$  w kolejnych punktach pomiarowych;
4. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami.

### 2.2.2. Pomiar wysokiego napięcia stałego iskiernikiem kulowym

Schemat pomiarowy:



Rys. 6. Schemat pomiaru wysokiego napięcia stałego iskiernikiem kulowym.



Tabela 8

Iskiernik kulowy D=12,5 cm				
a	$U_{znorm}$	$U_{pn}$	$U_{pn\ \acute{s}r}$	$U_6$
cm	kV	kV	kV	kV
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				
1				

Opracowanie wyników:

1. Sprawdzić i wpisać odpowiednie znormalizowane wartości napięć przeskoku [kV];
2. Obliczyć średnią arytmetyczną wartość napięcia przeskoku [kV];
3. Obliczyć napięcie przeskoku po korekcji [kV]
4. Wyznaczyć charakterystykę  $U_{znorm}$ ,  $U_6 = f(n)$  w kolejnych punktach pomiarowych;
5. Uwagi i wnioski odnośnie do warunków i sposobu przeprowadzania badań oraz dyskusja nad otrzymanymi wynikami.