

## BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH STANOWISKA DO WYSOKONAPIĘCIOWYCH PRÓB IZOLACJI

Radosław KŁOSIŃSKI<sup>1</sup>, Paweł CHULIST<sup>2</sup>

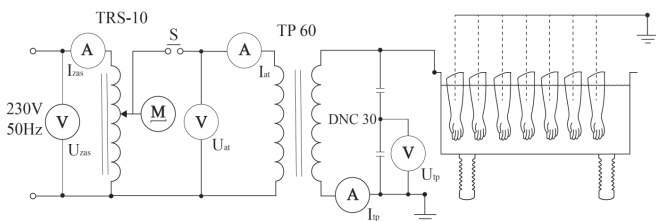
1. Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 68 3282233, e-mail: R.Klosinski@imei.uz.zgora.pl
2. Elpom Sp. z o.o.  
tel.: 605 650 228, e-mail: pawel.chulist@elpom.zgora.pl

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy analizy działania obwodu elektrycznego stanowiska do badania elektroizolacyjnego sprzętu ochronnego. Podczas pracy stanowiska stwierdzono, że napięcie probiercze jest znacznie odkształcone. Aby poznać przyczyny zniekształceń wykonano pomiary sygnałów napięcia i prądu w trzech miejscach obwodu. Ciągi próbek sygnałów poddano analizie widmowej i wyznaczono charakterystyki elementów układu. Analiza wyników pozwoliła stwierdzić, że przyczyną zniekształceń jest praca jednego z transformatorów w stanie nasycenia. Można zaobserwować zjawisko ferorezonansu prądów powodujące znaczne ich zniekształcenie. Drugim zaobserwowanym niekorzystnym zjawiskiem jest rezonans napięć powodujący wzmocnienie wybranych harmonicznych.

**Słowa kluczowe:** badanie sprzętu elektroizolacyjnego, analiza widmowa, charakterystyki częstotliwościowe, ferorezonans prądów.

### 1. WSTĘP

Wysokonapięciowe próby izolacji polegają na oddziaływaniu wysokim napięciem przemiennym na badane obiekty. Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat typowego stanowiska probierczego. Badane stanowisko służy do prób rękawic, półbutów i kaloszy elektroizolacyjnych.



Rys. 1. Schemat układu do badania elektroizolacyjnego sprzętu ochronnego wraz z układem pomiarowym do wyznaczania charakterystyk elementów stanowiska probierczego [1]

Podstawowe elementy układu to: transformator regulacyjny TRS-10, transformator probierczy TP-60 pracujący na zakresie 30 kV, wanna z wodą oraz 8 torów prądowych. Układ zasilany jest napięciem sieciowym  $U_{zas} = 230$  V,  $f = 50$  Hz, wyjściowe napięcie probiercze  $U_{tp}$  może być regulowane w zakresie  $0 \div 30$  kV.

Zgodnie z aktualnymi normami [2] i [3], napięcie wyjściowe wysokonapięciowych układów probierczych powinno spełniać określone wymagania odnośnie

parametrów: wartości skutecznej  $|U_{tp}|$ , współczynnika szczytu  $k_{Stp}$ , oraz współczynnika odkształcenia  $THDU_{tp}$ .

W trakcie pracy stanowiska realizowany jest ciągły pomiar wartości chwilowej napięcia probierczego  $U_{tp}$ . Wyznaczane na tej podstawie wartości wskazanych parametrów nie zawsze spełniają wymagania stawiane w normach. Odnotowano zbyt duże wartości współczynnika  $THD$  tego napięcia. Możliwą przyczyną zniekształceń jest duża różnica mocy znamionowej układu w stosunku do mocy pobieranej. Moc pozorna po stronie wtórnej transformatora probierczego nie przekracza 1,8 kVA a moce wykorzystywanych transformatorów wynoszą 10 kVA. Tak duży zapas mocy wynika z wymaganej wartości 0,3 A dopuszczalnego prądu zwarcia przy przebicciu.

Aby zbadać właściwości elementów układu oraz zachodzące w nim zjawiska i znaleźć przyczynę powstawania zniekształceń wykonano odpowiednie pomiary i obliczenia. Przedmiotem tej pracy są opis układu pomiarowego, wyniki pomiarów oraz analiza właściwości obwodu elektrycznego stanowiska. Przedstawione badania wykonano w ramach realizacji pracy magisterskiej [1].

### 2. UKŁAD POMIAROWY DO BADANIA STANOWISKA PROBIERCZEGO

Pomiar wartości chwilowej napięcia probierczego  $U_{tp}$  realizowany jest za pomocą wysokonapięciowego dzielnika pojemnościowego. Do wartości napięcia wyjściowego dzielnika dobrano przetwornik wartości chwilowej  $u/u$ .

Również wykonywany jest stały pomiar natężenia prądu strony wtórnej transformatora probierczego  $I_{tp}$ . Dzięki temu funkcjonuje zabezpieczenie różnicowoprądowe obwodu wysokonapięciowego realizowane programowo. Pomiar prądu  $I_{tp}$  wykonywany jest przez przetwornik wartości chwilowej  $i/u$ . Błędy stosowanych przetworników nie przekraczają 2 %.

Aby wyznaczyć charakterystyki elementów stanowiska, należało również mierzyć wartości chwilowe napięcia  $U_{zas}$  i prądu  $I_{zas}$  zasilania układu oraz napięcia  $U_{at}$  i prądu  $I_{at}$  strony wtórnej transformatora TRS-10. Pomiar obu prądów miał charakter tymczasowy, zrealizowano go za pomocą dwóch przystawek cęgowych CIE CA60. Ich dokładność na wykorzystywanym zakresie 10 mA – 10 A dla częstotliwości 40 – 2000 Hz wynosi 2,0 % + 5 mA.

Największy wpływ na niepewność pomiarów mają przetworniki i/u oraz u/u, szacuje się, że niepewność uzyskanych charakterystyk jest na poziomie 3 %.

Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk obwodu probierczego przedstawia rysunek 1. Miejsca pomiarów oznaczono symbolami mierników.

### 3. POMIARY

Pomiary wykonano w rzeczywistych warunkach pracy stanowiska. Stosowano trzy wielkości obciążenia: siedmioma lub dwiema rękawicami oraz bez rękawic.

Podczas jednej serii pomiarowej zbierano próbki 6 sygnałów: napięcia  $U_{zas}$  i prądu  $I_{zas}$  zasilania, napięcia  $U_{at}$  i prądu  $I_{at}$  strony wtórnej transformatora TRS-10 oraz napięcia  $U_{ip}$  i prądu  $I_{ip}$  strony wtórnej transformatora TP-60.

Chwilowe wartości sygnałów mierzono kartą akwizycji danych NI-6218. W serii pomiarowej każdy z sygnałów próbkowano z częstotliwością 10 kHz i rejestrowano 2000 próbek. Częstotliwość próbkowania nie była synchronizowana z częstotliwością napięcia sieciowego. Uznano, że, ze względu na analizowanie około dziesięciu okresów sygnału a więc znaczne rozsuniecie harmonicznym w widmie, wpływ ewentualnego przecieku widma nie spowoduje znaczącej zmiany uzyskiwanych wyników.

Dla każdego z obciążeń wykonano 11 serii pomiarowych przy zwiększaniu napięcia wyjściowego transformatora regulacyjnego w zakresie  $0 \div 140$  V o około 14 V. Łącznie przy pomiarach podstawowych wykonano 33 serie pomiarowe, co przy rejestrowaniu 6 przebiegów na serię dało 198 przebiegów.

Obróbkę zebranych danych wykonano wykorzystując programy Excel i Matlab. Za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera wyznaczono widmo amplitudowe każdego przebiegu. Również dla wszystkich przebiegów wyznaczono wartość skuteczną, współczynnik odkształcenia THD oraz współczynnik szczytu.

Na podstawie wyznaczonych widm amplitudowych zebranych przebiegów stwierdzono pomijalnie małe wartości amplitud parzystych harmonicznym oraz harmonicznym o numerach wyższych od 19. Z uwagi na to, w celu zwiększenia czytelności, zdecydowano przedstawić charakterystyki częstotliwościowe elementów stanowiska probierczego tylko dla harmonicznym nieparzystych od 0 do 19.

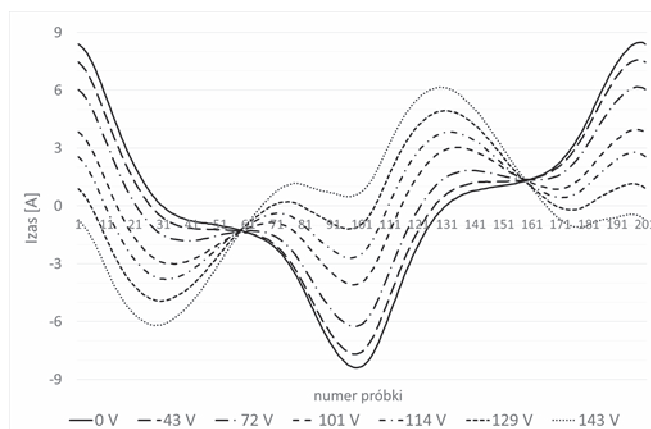
Dla pełniejszej analizy zjawisk zachodzących na stanowisku probierczym wykonano dodatkowo pomiar charakterystyki prądowo napięciowej transformatora regulacyjnego TRS-10 oraz wyznaczono indukcyjność uzwojenia wtórnego transformatora probierczego TP-60.

## 4. WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

### 4.1. Przebiegi prądu pobieranego przez stanowisko z sieci zasilającej

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prądu  $I_{zas}$  pobieranego z sieci zasilającej przez stanowisko obciążone 7 rękawicami przy różnych wartościach napięcia regulacyjnego  $U_{at}$ . Przebiegi obejmują jeden okres prądu mieszczący się między przejściami przez zero odpowiadających im sygnałów napięcia. Na podstawie kształtu przebiegów oraz faktu ich zależności od wartości napięcia można wnioskować, że w układzie występuje ferrezonans prądów na równoległym połączeniu

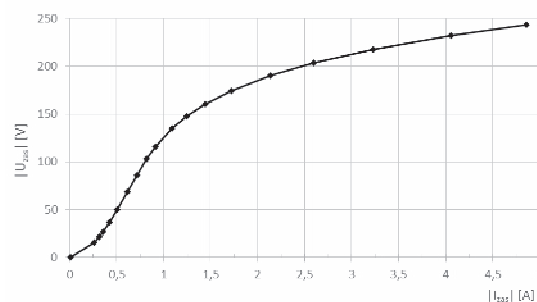
indukcyjności transformatorów regulacyjnego i probierczego oraz pojemności badanego sprzętu dielektrycznego.



Rys. 2. Przebiegi prądu  $I_{zas}$  układu obciążonego 7 rękawicami dla różnych napięć transformatora regulacyjnego  $U_{at}$

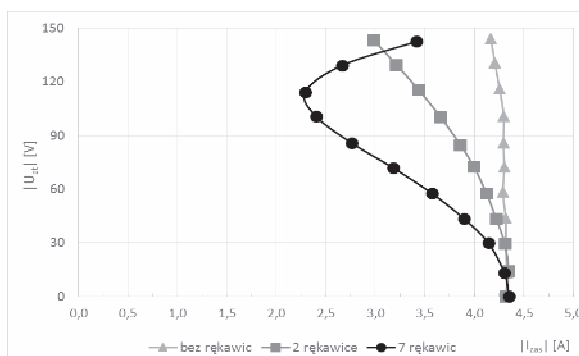
### 4.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe transformatora regulacyjnego TRS-10

Na rysunku 3 zaprezentowano charakterystykę prądowo-napięciową  $|U_{zas}| = f(I_{zas})$  transformatora TRS-10. Na podstawie charakterystyki można wnioskować, że przy znamionowym napięciu sieci zasilającej o wartości skutecznej  $|U_{zas}| = 230$  V rdzeń transformatora TRS-10 pracuje w stanie nasycenia.



Rys. 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa  $|U_{zas}| = f(I_{zas})$  nieobciążonego transformatora TRS-10

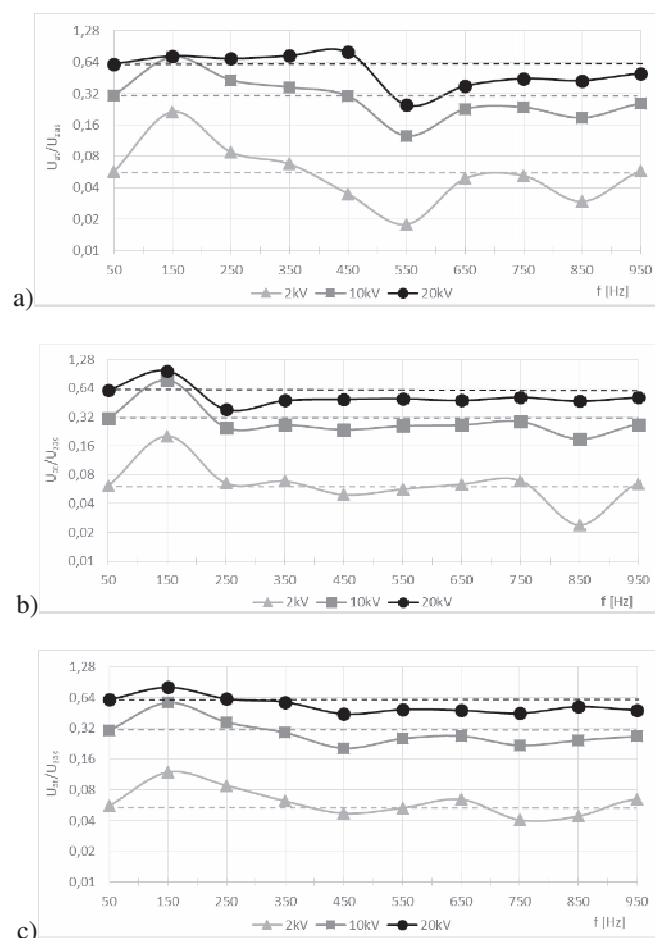
Przedstawione na rysunku 4 zależności napięcia strony wtórnej od prądu strony pierwotnej  $|U_{at}| = f(I_{zas})$  potwierdzają przypuszczenie występowania zjawiska ferrezonansu zachodzącego w transformatorze TRS-10. Typowo ferrezonansowy kształt ma charakterystyka dla układu obciążonego pojemnością 7 rękawic izolacyjnych.



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe  $|U_{at}| = f(I_{zas})$  transformatora TRS-10 przy różnych obciążeniach

### 4.3. Przekładnia napięciowa obciążonego transformatora regulacyjnego TRS-10

Rysunek 5 przedstawia rodziny charakterystyk częstotliwościowych przekładni napięciowej  $U_{pr}/U_{zas}$  obciążonego transformatora TRS-10 dla różnych obciążeń układu. Na większości charakterystyk widać wyraźne podwyższenie przekładni dla trzeciej harmonicznej. Prawdopodobnie jest to spowodowane wysokimi wartościami amplitudy trzeciej harmonicznej znacznie odkształconych przebiegów prądu zasilającego stanowisko  $I_{zas}$  wynikających z nasycenia rdzenia tego transformatora.

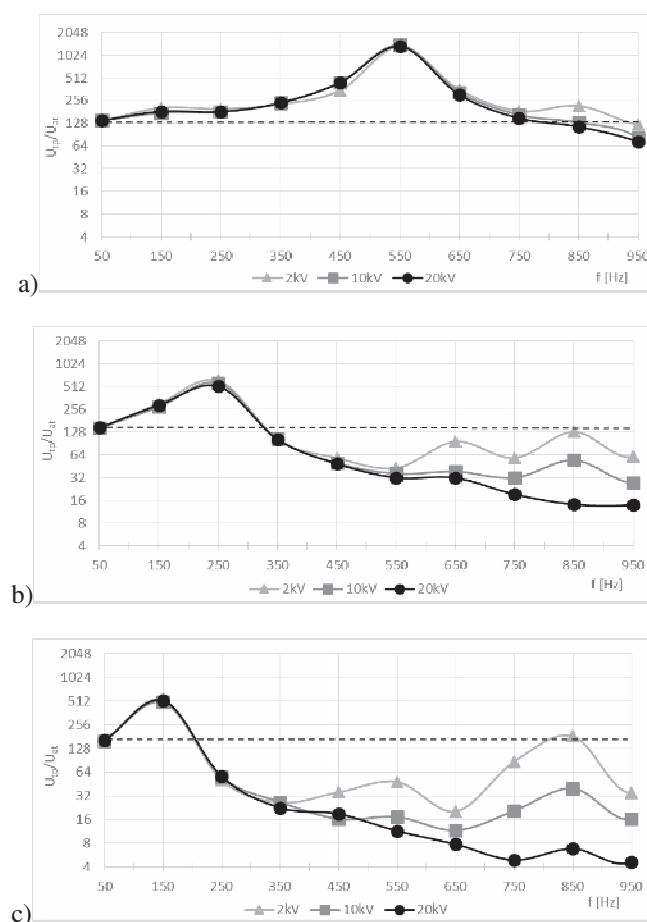


Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe przekładni napięciowej obciążonego transformatora TRS-10, obciążenie układu: a) 0 rękawic, b) 2 rękawice, c) 7 rękawic

### 4.4. Przekładnia napięciowa obciążonego transformatora probierczego TP-60

Na rysunku 6 przedstawiono rodziny charakterystyk częstotliwościowych przekładni napięciowej obciążonego transformatora probierczego TP-60 dla różnych wartości obciążeń układu. Dla układu nieobciążonego (rys. 6a), niezależnie od wartości napięcia probierczego  $U_{pr}$ , widać ponad 8-krotne zwiększenie przekładni dla 11. harmonicznej. Przy obciążeniu dwoma rękawicami (rys. 6b) około 4-krotne zwiększenie przekładni występuje dla 5. harmonicznej, natomiast dla obciążenia siedmioma rękawicami (rys. 6c) około 4-krotne zwiększenie przekładni występuje dla 3. harmonicznej. Po przekroczeniu wskazanych maksimum, wraz ze wzrostem częstotliwości znacznie maleje wartość przekładni. Prawdopodobnie powodem takiego przebiegu charakterystyk jest zjawisko liniowego rezonansu napięć. Przebiegi charakterystyk mają typowy kształt przebiegu

zależności napięcia na kondensatorze od częstotliwości w szeregowym obwodzie rezonansowym, szczególnie dla  $U_{pr} = 20$  kV.



Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe przekładni napięciowej obciążonego transformatora TP-60, obciążenie: a) 0 rękawic, b) 2 rękawice, c) 7 rękawic

W celu weryfikacji hipotezy o rezonansie oszacowano pojemności obciążeń układu oraz indukcyjność uzwojenia wtórnego transformatora probierczego TP-60 na zakresie, na którym pracuje, do 30 kV.

W obliczeniach pojemności przyjęto, że obciążenie układu ma charakter ściśle pojemnościowy. Obliczenia wykonano dla podstawowej harmonicznej napięcia  $U_{pr}$  i prądu  $I_{pr}$ . Reaktancja  $X_{C0}$  i pojemność  $C_0$  szyn wysokonapięciowych wraz z dzielnikiem pojemnościowym:

$$X_{C0} = \frac{U_{1tp0}}{I_{1tp0}} = \frac{14,22 \text{ kV}}{2,68 \text{ mA}} = 5,31 \text{ M}\Omega \quad (1)$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f X_{C0}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 5,31 \text{ M}\Omega} = 0,59 \text{ nF} \quad (2)$$

gdzie:  $U_{1tp0}$ ,  $I_{1tp0}$  – amplitudy podstawowej składowej harmonicznej napięcia i prądu przy obciążeniu stanowiska tylko szynami wysokonapięciowymi i dzielnikiem napięcia.

Szacunkową pojemność jednej rękawicy obliczono na podstawie reaktancji układu obciążonego 7 rękawicami:

$$X_{C7} = \frac{U_{1tp7}}{I_{1tp7}} = \frac{16,28 \text{ kV}}{51,24 \text{ mA}} = 317,7 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$C_7 = \frac{1}{2\pi f X_{C7}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 317,7 \text{ k}\Omega} = 10,01 \text{ nF} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{C_7 - C_0}{7} = \frac{10,01 \text{ nF} - 0,59 \text{ nF}}{7} = 1,35 \text{ nF} \quad (5)$$

gdzie:  $X_{C7}$ ,  $C_7$ ,  $U_{1p7}$ ,  $I_{1p7}$ , – odpowiednio, reaktancja i pojemność układu oraz amplitudy podstawowej harmonicznego napięcia i prądu przy obciążeniu stanowiska 7 rękawicami wraz z szynami wysokonapięciowymi i dzielnikiem napięcia,  $C_1$ , – pojemność 1 rękawicy.

Indukcyjność uzwojenia wtórnego transformatora TP-60 oszacowano wykonując pomiary po odłączeniu transformatora od układu. Zmierzono rezystancję uzwojenia multimetrem BRYMEN 869 natomiast impedancję wyznaczono metodą techniczną mierząc napięcie multimetrem BRYMEN 869 a prąd multimetrem FLUKE 85. Uzyskano wartości reaktancji i indukcyjności:

$$X_{tp} = \sqrt{\frac{|U|^2}{|I|^2} - R_{tp}^2} = \sqrt{\left(\frac{234,1}{0,00313}\right)^2 - 7500^2} \text{ k}\Omega = 74,4 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

$$L_{tp} = \frac{X_{tp}}{\omega} = \frac{74400 \text{ k}\Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 237 \text{ H} \quad (7)$$

Na podstawie oszacowanych pojemności i indukcyjności  $L_{tp}$  uzwojenia transformatora TP-60 obliczono częstotliwości rezonansowe dla 3 stosowanych obciążeń, tj.: bez rękawic, 2 rękawicami i 7 rękawicami.

$$f_{r0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{tp}C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{237 \text{ H} \cdot 0,59 \text{ nF}}} = 426 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{tp}(2C_1 + C_0)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{237 \text{ H}(2 \cdot 1,35 + 0,59) \text{ nF}}} = 180 \text{ Hz} \quad (9)$$

$$f_{r7} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{tp}C_7}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{237 \text{ H} \cdot 10,01 \text{ nF}}} = 103 \text{ Hz} \quad (10)$$

## RESEARCH AND ANALYSIS OF ELECTRICAL PROPERTIES OF LABORATORY STATION FOR HIGH-VOLTAGE TESTS OF INSULATION

This article deals with the analysis of the electrical circuit of the electrical insulating equipment inspection stand. The test stand consists of two transformers, the TRS-10 regulator and the TP-60 tester. The test voltage can be adjusted from 0 to 30 KV. During the operation of the station it was found that the test voltage is significantly deformed. In order to know the causes of distortion, measurements of voltage and current signals were made at three locations of the circuit. Signal samples were subjected to spectral analysis and the characteristics of system components were designated. Analysis of the results showed that the cause of the distortion is the operation of one of the transformers in the saturation state. The signals of currents obtained for different settings of the transformer have a deformed waveform (fig. 2), typical of the ferroresonance phenomenon. The occurrence of this phenomenon confirms the course of the characteristic (Fig. 4). The second observed unfavorable phenomenon is resonance of voltages in the high voltage circuit, resulting in the strengthening of selected harmonics of voltage. This phenomenon can be observed on the basis of the shape of frequency characteristics of the loaded test transformer TP-60 (Fig. 6).

**Keywords:** electro-insulating equipment testing, spectral analysis, frequency response, ferroresonance of currents.

Uzyskane częstotliwości rezonansowe są mniejsze niż częstotliwości harmonicznnych dla których występowały maksima charakterystyk przekładni napięciowej transformatora probierczego TP-60 (rys. 6). Te rozbieżności można wyjaśnić tym, że indukcyjność uzwojenia wtórnego została wyznaczona przy otwartym obwodzie uzwojenia pierwotnego natomiast w trakcie pracy obwodu uzwojenie pierwotne pracuje w obwodzie zamkniętym. Zamknięcie obwodu uzwojenia pierwotnego obniża indukcyjność zastępczą widzianą od strony uzwojenia wtórnego powodując podwyższenie częstotliwości rezonansowych.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono sposób realizacji pomiarów i wyniki badania stanowiska do wysokonapięciowych prób izolacji przeprowadzonych w celu wykrycia przyczyn powstawania zniekształceń napięcia probierczego. Zaprezentowano charakterystyki elementów stanowiska wyznaczone na podstawie wykonanych pomiarów.

Analiza uzyskanych charakterystyk pozwoliła stwierdzić następujące przyczyny zniekształcania napięcia probierczego i prądów. Głównym powodem zniekształceń jest znaczne nasycenie rdzenia transformatora regulacyjnego TRS-10. Ze względu na pojemnościowy charakter obciążenia układu zachodzi zjawisko ferrorezonansu prądów dające silne zniekształcenie prądów i napięć. Drugim niekorzystnym zjawiskiem jest liniowy rezonans napięć w wysokonapięciowym układzie probierczym. Powoduje on zwiększenie zniekształcenia napięcia probierczego.

Aby uzyskać prawidłowe warunki prób wysokonapięciowych trzeba odpowiednio dobrać elementy stanowiska probierczego, to będzie przedmiotem dalszych badań

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Chulist P.: Wyznaczenie charakterystyk elementów układu stanowiska do badania elektroizolacyjnego sprzętu ochronnego, Praca magisterska, WIEiA UZ, Zielona Góra 2016.
2. PN-EN 60903:2006 - Prace pod napięciem - Rękawice z materiału izolacyjnego
3. PN-EN 50321:2002 - Obuwie elektroizolacyjne do pracy przy instalacjach niskiego napięcia