

Maciej CIUBA
Maciej OWSIŃSKI

PORÓWNANIE TEMPERATUROWYCH WŁASNOŚCI POJEMNOŚCIOWYCH DZIELNIKÓW NAPIĘCIA O RÓŻNYCH KONSTRUKCJACH CZŁONU WYSOKONAPIĘCIOWEGO

STRESZCZENIE *Pojemnościowe dzielniki napięcia są powszechnym i ważnym elementem wysokonapięciowych systemów probierczopomiarowych, zatem istotne jest zbadanie korzyści z zastosowania w nich nowych konstrukcji kondensatorów. W artykule zawarto koncepcję oraz budowę dwóch konstrukcji dzielnika pojemnościowego SN, w których człony dolne obu dzielników złożono z kondensatorów polipropylenowych natomiast w członach górnych rozważono kondensatory ceramiczne lub polipropylenowe. Artykuł opisuje też wyniki porównania własności eksploatacyjnych obu rozwiązań oraz wnioski płynące z analizy ich przekładni w funkcji temperatury.*

Słowa kluczowe: *dzielnik pojemnościowy, dzielnik wysokonapięciowy, kondensatory ceramiczne, kondensatory polipropylenowe*

1. WSTĘP

Artykuł zawiera opis i wyniki badania wpływu temperatury na przekładnię dzielników mających współpracować z transformatorem probierczym typu TP-60. Ze względu na wykorzystanie tego typu transformatorów w pracach dydaktyczno-naukowych w Laboratorium Wysokich Napięć Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej podjęto się modyfikacji układu pomiarowego.

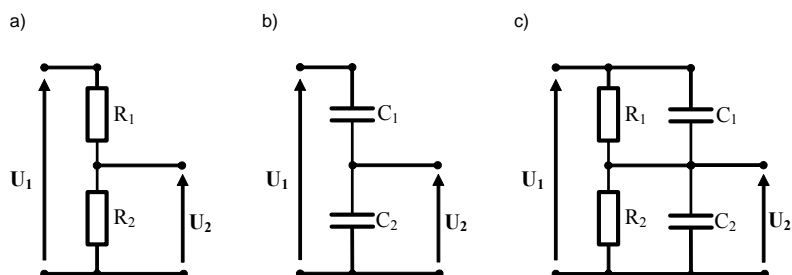
mgr inż. Maciej CIUBA
e-mail: maciej.ciuba@ee.pw.edu.pl
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 00-661 Warszawa, pl. Politechniki 1

mgr inż. Maciej OWSIŃSKI
e-mail: maciej.owsinski@ien.com.pl
Instytut Energetyki, Warszawa, 01-330 Warszawa, ul. Mory 8

Stworzyło to okazję do opracowania kilku koncepcji dzielników pojemnościowych różniących się typem kondensatorów zastosowanych w członie wysokonapięciowym oraz zbadania temperaturowych własności wybranych konstrukcji w zakresie temperatur występujących w miejscu stosowania, a wahających się między 16 a 35°C. Przy opracowaniu koncepcji dzielników oraz badaniach podjęto współpracę z Laboratorium Wieloprądowym IEN Warszawa-Mory.

2. DZIELNIKI DLA NAPIĘĆ PRZEMIENNYCH

Dzielniki napięciowe dla napięć przemiennych o częstotliwości sieciowej mogą być wykonane jako dzielniki rezystancyjne, pojemnościowe i mieszane.



Rys. 1. Schematy elektryczne dzielników napięcia:

a) rezystancyjnego; b) pojemnościowego; c) mieszanego

Dzielniki rezystancyjne (rys. 1a) odwzorowują kształt krzywej i fazę napięcia, jednak pobierają prąd czynny ze źródła, a więc ich elementy nagrzewają się. Nagrzewanie się rezystorów w czasie pomiarów (szczególnie długotrwałych) może wpływać niekorzystnie na przekładnię nawet bez udziału zmian temperatury otoczenia. Aby tego uniknąć należałoby stosować dzielniki o stosunkowo dużych rezystancjach części wysokonapięciowej. Pociąga to za sobą uczulenie dzielnika na zbliżenie do przedmiotów przewodzących (szczególnie uziemionych) poprzez pojemności, co wpływa na przekładnię dzielnika.

Dzielniki pojemnościowe (rys. 1b) pobierają praktycznie tylko składową bierną, więc nagrzewanie elementów dzielnika jest znikome. Wpływ pojemności doziemnych można ograniczyć do pomijalnego przez odpowiedni dobór wartości pojemności członu wysokonapięciowego. Przesunięcie w fazie napięcia członu niskonapięciowego względem napięcia mierzonego dzielnikiem nie stanowi problemu, jeśli dzielnik służy tylko do połączenia go z miernikiem wartości skutecznej czy szczytowej.

Dzielniki mieszane (rys. 1c) łączą zalety obu wyżej wymienionych typów dzielników. Dzięki doborowi stałej czasowej $\tau_x = R_x C_x$ członu wysokonapięciowego równej stałej czasowej członu niskonapięciowego można uzyskać stałość przekładni w szerokim zakresie częstotliwości. Ze względu na fakt, że nie wszędzie ta cecha jest

wymagana, w wielu wypadkach można z powodzeniem zastosować dzielnik pojemnościowy, co ogranicza liczbę użytych elementów.

3. KONCEPCJA KONSTRUKCJI DZIELNIKÓW

Porównywane były dwie konstrukcje dzielnika pojemnościowego różniące się kondensatorami zastosowanymi w członie wysokonapięciowym.

Wartość pojemności członu wysokonapięciowego została określona następującymi kryteriami:

- musi mieć nominalną wytrzymałość napięciową oraz odpowiedni zapas,
- musi być odpowiednio mała, by nie obciążać źródła zbytnim prądem pojemnościowym,
- musi być odpowiednio duża, by zminimalizować wpływ pojemności doziemnych

Założenia dla obu opracowanych dzielników napięcia wyglądały następująco:

- Napięcie znamionowe $U_{1N} = 60 \text{ kV}$ ($f = 50 \text{ Hz}$),
- Przekładnia napięciowa $\mathcal{G}_N = 2000$ i 3000 ,
- Pojemność $C_1 > 10 \cdot C_p > 10 \cdot 20 \text{ pF/m} \cdot 1,2 \text{ m} > 240 \text{ pF}$,
Moc bierna pojemnościowa $Q_C < 5\% \cdot S_{(N_TP60)} \rightarrow Q_C < 5\% \cdot 10 \text{ kVA} < 500 \text{ VAR}$,
 $I = U\omega C \rightarrow C_1 = I/(\omega U) = Q/(\omega U^2)$, $C_1 < 442,1 \text{ pF}$
- Środek przedziału: $(240+442,1)/2 = 341,05 \text{ pF}$

Powyżej przyjęto następujące oznaczenia: U_{1N} – napięcie znamionowe części wysokonapięciowej, \mathcal{G}_N – wstępnie zakładana przekładnia, C_1 – pojemność członu górnego, C_p – pojemność pasożytnicza członu górnego, Q_C – moc bierna pojemnościowa pobierana z transformatora, $S_{(N_TP60)}$ – znamionowa moc transformatora TP-60 (10 kVA).

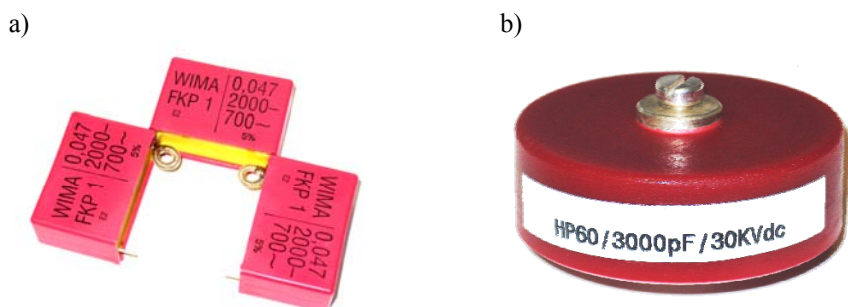
3.1. Dzielnik z kondensatorami polipropylenowymi

W konstrukcji dzielnika opartego na kondensatorach polipropylenowych użyto kondensatorów FKP1-47N/2000 produkcji WIMA o pojemności 47 nF oraz napięciu pracy 700 VAC. Kondensatory połączono szeregowo tak by uzyskać wartość pojemności z zakresu między środkiem przedziału wyznaczonego w założeniach a maksymalną dopuszczalną wartością ze względu na obciążenie źródła.

Moduły złożone z trzech kondensatorów każdy (rys. 2a) ułożono w kolumnę mającą 43 stopnie a cała konstrukcja opierała się na pręcie tekstolitowym. Człon wysokonapięciowy po złożeniu osiągnął wysokość ok. 1,2 m.

Kondensatory członu wysokonapięciowego mają tolerancję znamionową 5% jednak pomiar za pomocą przyrządu IM3533-01 firmy HIOKI wykazał, że żaden ze 129 kondensatorów nie odbiegał o więcej niż 2% od pojemności znamionowej.

Człon niskonapięciowy zestawiono z kondensatorów polipropylenowych tego samego typu jak w części wysokonapięciowej, czyli FKP1.



Rys. 2. Kondensatory zastosowane w dzielniku z kondensatorami:

a) polipropylenowymi – widoczny pojedynczy moduł członu górnego; b) ceramicznymi

3.2. Dzielnik z kondensatorami ceramicznymi

Konstrukcja dzielnika bazująca na kondensatorach ceramicznych zawierała kondensatory górnego członu typu HP60E30302M firmy AVX (rys. 2b) mające za dielektryk ceramikę opartą na Stronczie, oraz kondensatory dolnego członu typu FKP1 z dielektrykiem z folii polipropylenowej firmy WIMA. Kondensatory części wysokonapięciowej o napięciu znamionowym 30 kV/12k V~ dobrano tak, by ich wypadkowa pojemność była zbliżona do pojemności wysokonapięciowego członu dzielnika z kondensatorami polipropylenowymi. Spełnione zostały wtedy założenia wymienione w punkcie 3. Kondensatory z ceramiką strontową mają tolerancję 20% jednak pomiary za pomocą przyrządu IM3533-01 firmy HIOKI wykazały, iż wszystkie z dziewięciu użytych kondensatorów tego typu miały pojemność nieodbiegającą od znamionowej o więcej niż 2%.

4. STANOWISKO POMIAROWE

Stanowisko pomiarowe składało się z obu dzielników umieszczonych w komorze umożliwiającej podniesienie wewnątrz temperatury, utrzymanie jej oraz uzyskanie równomiernego rozkładu temperatury. Układ pomiarowy zawierał transformator probierczy TP-110, dzielnik referencyjny RCZ500Ref firmy Haefely oraz mierniki PC5000 firmy Sanwa i termometr cyfrowy CIE305 z termoparą typu K. Aparaturę pomocniczą stanowił bezszcztkowy regulator napięcia TRP-10.

Układ regulacji napięcia zapewniał płynną zmianę napięcia pomiarowego. Dzielniki umieszczono w odległości minimalizującej wpływ pojemności wzajemnych.



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska pomiarowego, gdzie:
1 – komora termiczna, 2 – TP-110, 3 – RCZ500Ref,
4 – TRP-10, 5 – stanowisko regulacyjno-pomiarowe



Rys. 4. Komora przed umieszczeniem elementu grzejnego
Dzielnik z kondensatorami : 1 – ceramicznymi, 2 – polipropylenowymi

Górne zaciski obu dzielników zostały dołączone do elektrod o obłych kształtach zapewniających redukcję zjawiska ulotu z punktu o najwyższym potencjale względem ziemi.

5. BADANIE PRZEKŁADNI W FUNKCJI NAPIĘCIA W RÓŻNYCH TEMPERATURACH

Po umieszczeniu wewnątrz komory elementu grzejnego z wymuszonym obiegiem powietrza oraz jej szczelnym zamknięciu dokonano pomiarów zwiększając napięcie mierzone a następnie je zmniejszając co 20% U_N . Na każdym z poziomów wykonano dziesięć pomiarów w równych odstępach czasowych. Pomiaru napięć członów niskonapięciowych z obu dzielników dokonywano jednocześnie poprzez system manualnego wymuszenia zachowania wyniku pomiaru z obu woltomierzy. Równocześnie mierzone było napięcie z dolnego członu dzielnika referencyjnego.

Przekładnię dzielnika referencyjnego przyjęto jako $\mathcal{G}_N = 1383,47$ na podstawie świadectwa wzorcowania nr 01100849 wydanego przez Deutscher Kalibrierdienst. Korzystając z dziesięciu pomiarów napięcia $U_{i_LV_Ref}$ z dolnego członu dzielnika referencyjnego ustalano wartość średnią, którą mnożono przez jego przekładnię \mathcal{G}_N uzyskując napięcie referencyjne U_{HV_Ref} :

$$U_{HV_Ref} = \mathcal{G}_N \cdot \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} U_{i_LV_Ref} \quad (1)$$

Przekładnie badanych dzielników \mathcal{G}_{test} wyznaczono dzieląc obliczone napięcie U_{HV_Ref} przez średnią z dziesięciu odczytów napięcia dolnych członów każdego z tych dzielników $U_{i_LV_test}$:

$$\mathcal{G}_{test} = \frac{U_{HV_Ref}}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} U_{i_LV_test}} \quad (2)$$

W ten sposób przekładnia wyznaczana była co 20% napięcia znamionowego dzielników a więc co 12 kV oraz dodatkowo przy napięciu 1,1 $U_N = 66$ kV.

Korzystając z wartości przekładni $\mathcal{G}_{AVG_U(k)}$ na danym k-tym poziomie napięcia oraz ze średniej z przekładni z wszystkich poziomów napięć \mathcal{G}_{AVG_tot} wyznaczone zostało procentowe odchylenie $\mathcal{D}\%$ od tej średniej w celu zobrazowania zmian przekładni z funkcji mierzonego napięcia. W tym celu zastosowano wzór:

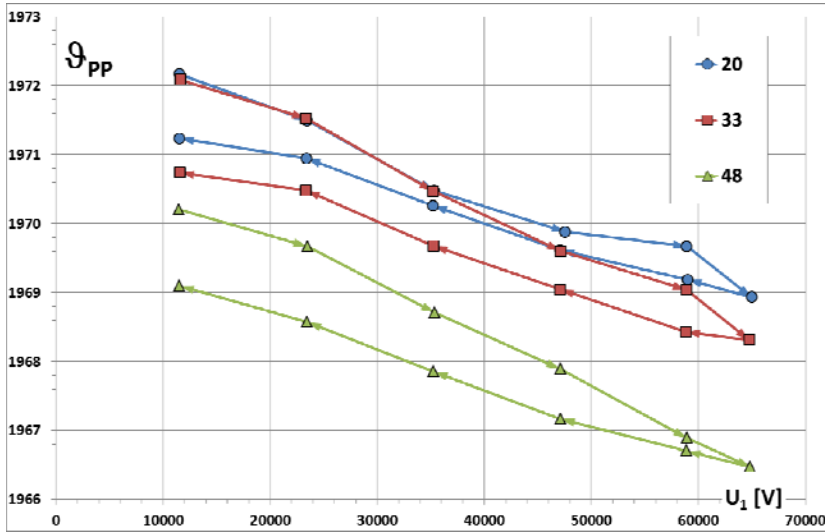
$$\mathcal{D}_{\mathcal{G}_k} [\%] = \frac{\mathcal{G}_{AVG_U_k} - \mathcal{G}_{AVG_tot}}{\mathcal{G}_{AVG_tot}} \quad (3)$$

Powyższą procedurę wykonano w trzech różnych temperaturach uzyskanych w komorze po czasie, gdy temperatura nie zmieniała się o więcej niż 1°C na 10minut.

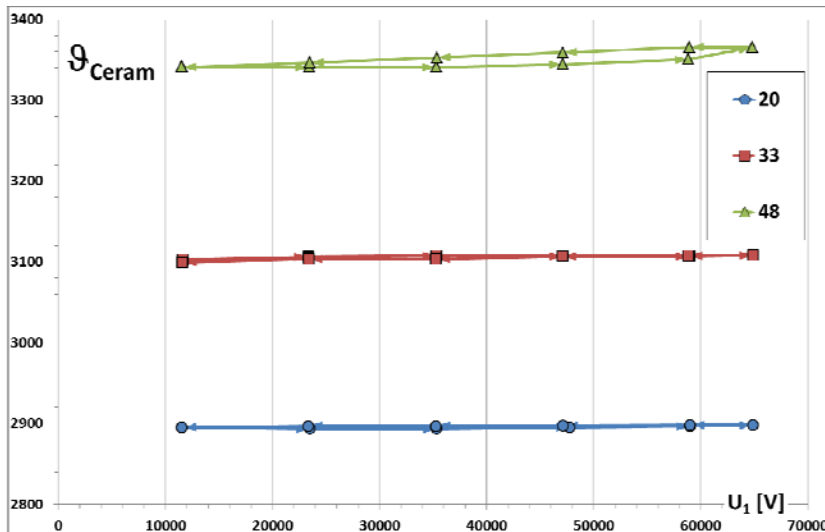
W stanie cieplnie ustalonym rozrzut temperatur między różnymi punktami pomiarowymi wewnątrz komory nie przekroczył 4°C a więc $\pm 2^\circ\text{C}$ od średniej.

6. WYNIKI OBLICZEŃ

Poniższe wykresy (rys. 5 i 6) przedstawiają graficznie zależność przekładni badanych dzielników od mierzonego napięcia dla trzech różnych temperatur pracy.

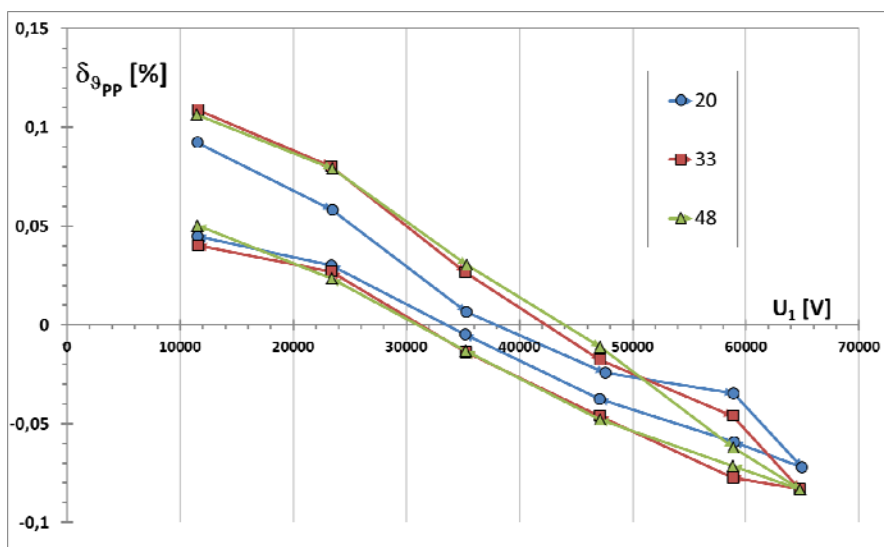


Rys. 5. Przekładnia dzielnika z kondensatorami polipropylenowymi w funkcji napięcia dla trzech różnych temperatur: 20, 33 i 48°C

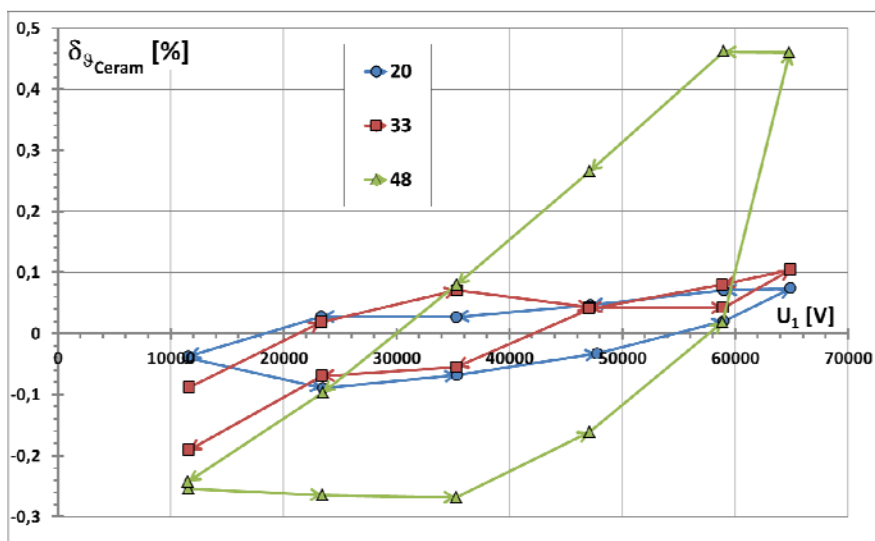


Rys. 6. Przekładnia dzielnika z kondensatorami ceramicznymi w funkcji napięcia dla trzech różnych temperatur: 20, 33 i 48°C

Kolejne wykresy (rys. 7 i 8) obrazują procentowe odchylenie średniej przekładni na danym poziomie napięcia od średniej wartości przekładni dla wszystkich napięć.



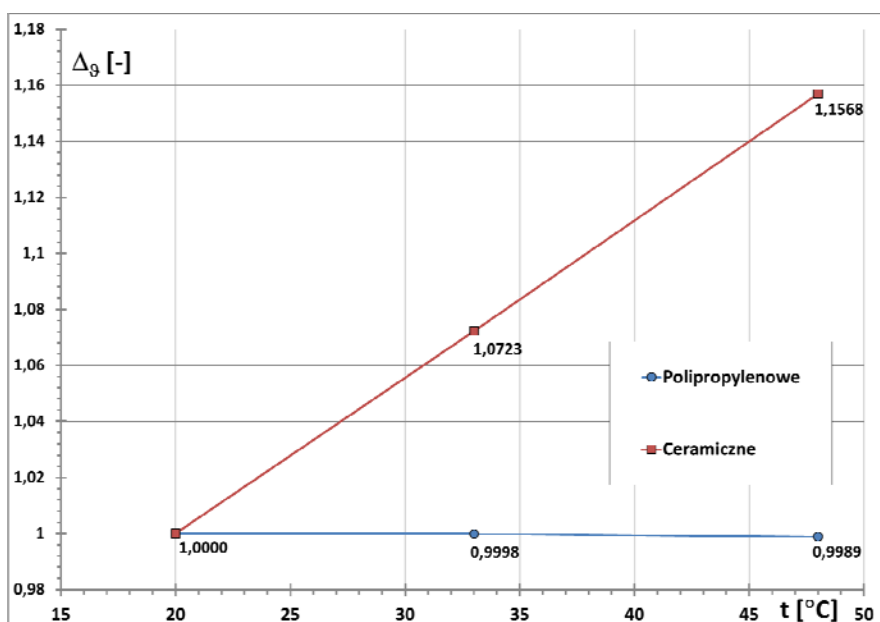
Rys. 7. Procentowa zmiana przekładni względem wartości średniej dzielnika z kondensatorami polipropylenowymi w funkcji napięcia dla trzech różnych temperatur: 20, 33 i 48°C



Rys. 8. Procentowa zmiana przekładni względem wartości średniej dzielnika z kondensatorami ceramicznymi w funkcji napięcia dla trzech różnych temperatur: 20, 33 i 48°C

Dla każdej temperatury wyznaczono średnią przekładnię $\mathcal{G}_{\text{AVG}_{\text{cycle}}}$ z całego cyklu zwiększania i zmniejszania napięcia. Po odniesieniu jej wartości w każdej z temperatur T_x do wartości w temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$ uzyskano względną zmianę Δ_g przedstawioną na rysunku 9 w funkcji temperatury pracy dzielników.

$$\Delta_g(T_x = [20, 33, 48]^\circ\text{C}) = \frac{\mathcal{G}_{\text{AVG}_{\text{cycle}}}(T_x)}{\mathcal{G}_{\text{AVG}_{\text{cycle}}}(T = 20^\circ\text{C})} \quad (4)$$



Rys. 9. Względna zmiana średniej wartości przekładni w różnych temperaturach w odniesieniu do jej wartości w temperaturze 20°C

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie prac konstrukcyjnych oraz analizy wyników uzyskanych z 1320 pomiarów można wnioskować co następuje:

- 1) Dzielnik z kondensatorami ceramicznymi ma zdecydowanie mniejsze gabaryty od konstrukcji z kondensatorami polipropylenowymi, jednak 9 kondensatorów z ceramiką opartą na stronczie w zalewie żywicznej było około 2,4 razy droższe niż 129 kondensatorów z dielektrykiem polipropylenowym;
- 2) Obie konstrukcje wykazały zależność przekładni od napięcia, oraz dodatkowo przekładnia w obu przypadkach okazała się zależna od tego, czy napięcie jest podnoszone czy obniżane;

- 3) W konstrukcji z kondensatorami polipropylenowymi w członie wysokonapięciowym przekładnia malała wraz ze wzrostem napięcia, po czym rosła przy jego obniżaniu, czego przyczyną mogą być powiększające się zjonizowane obszary górnej części dielektryka (bliżej zacisku wysokiego napięcia), które zwiększają pojemności pasożytnicze między stopniami części wysokonapięciowej, co wpływa na nieznaczny wzrost wypadkowej pojemności członu wysokonapięciowego;
- 4) Przy kondensatorach polipropylenowych w członie górnym wartość przekładni była zawsze wyższa przy podnoszeniu napięcia niż przy jego obniżaniu, jednak różnice te nie przekraczały 0,1% średniej wartości przekładni dla każdej z badanych temperatur otoczenia;
- 5) W dielektryku z kondensatorami ceramicznymi w członie górnym dla każdej temperatury otoczenia przekładnia dielektryka rosła przy zwiększaniu napięcia oraz malała przy jego obniżaniu. Może to wynikać z faktu zastosowania różnego typu kondensatorów w członie górnym i dolnym tego dielektryka;
- 6) Przy kondensatorach ceramicznych w członie górnym wartość przekładni w większości przypadków była niższa przy podnoszeniu napięcia niż przy jego obniżaniu, różnice te zależały o wiele silniej od temperatury niż w drugiej konstrukcji dielektryka i przy 48°C osiągnęła 0,4% średniej wartości przekładni przy $0,8 U_N$ (rys. 8);
- 7) Wykazano (rys. 9), że przekładnia obu konstrukcji dielektryków zależy nie tylko od napięcia i kierunku zmiany jego wartości, ale też od temperatury pracy. Oba dielektryki zmieniły wartość przekładni przy wzroście temperatury, przy czym przy wzroście temperatury z 20°C do 48°C a więc przyroście o 28°C konstrukcja oparta tylko na kondensatorach polipropylenowych zmniejszyła swą przekładnię o ok. 0,11%, natomiast konstrukcja z członem górnym z kondensatorów ceramicznych a dolnym z polipropylenowych zwiększyła swoją przekładnię o ok. 15,7%;
- 8) Konstrukcja złożona w całości z kondensatorów polipropylenowych mimo większych gabarytów (można je zmniejszyć przez dostosowanie konstrukcji do zalania olejem elektroizolacyjnym) jest tańsza a jej przekładnia jest stabilniejsza zarówno w funkcji napięcia mierzonego jak i temperatury pracy niż w przypadku dielektryka z częścią wysokonapięciową z kondensatorów ceramicznych;
- 9) Niewątpliwą zaletą kondensatorów ceramicznych jest łatwość ich łączenia w szereg za pomocą pręcików gwintowanych. Połączenie 129 kondensatorów polipropylenowych w szereg jest bardziej czasochłonne oraz wymaga ostrożności, by nie przegrzać elementów.

Przedstawiony artykuł opisuje wstęp do obszerniejszych badań nad własnościami konstrukcji dielektryków wysokiego napięcia z zastosowaniem nowoczesnych materiałów, oraz porównanie ich z dotychczasowymi rozwiązaniami.

LITERATURA

1. Gacek Z.: Przykłady obliczeniowe z techniki wysokich napięć. Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 1994 (wyd. 2).
2. Praca zbiorowa pod redakcją J. Fleszyńskiego: Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. OWPWr, Wrocław, 1999.

3. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. Warszawa, WNT, 2015.
4. Praca zbiorowa pod redakcją R. Kosztaluka: Technika badań wysokonapięciowych, Tom 1, WNT, Warszawa, 1985.
5. Teachawong M., Trakulkan Ch.: Design and invention a 150 kV capacitive high voltage divider set, JICTEE-2014 - Conference Materials, IEEE, March 2014.
6. IEEE Std. 4: Standard Techniques for High-Voltage Testing. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, March 1995.

Przyjęto do druku dnia 15.09.2015 r.

COMPARISON OF TEMPERATURE PROPERTIES OF CAPACITIVE VOLTAGE DIVIDERS WITH DIFFERENT CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE SECTION

Maciej CIUBA, Maciej OWSIŃSKI

ABSTRACT *This article presents results of comparison of two capacitive voltage divider constructions designed and made in the cooperation between the High Voltage and EMC Department of Electrical Faculty of the Warsaw University of Technology and the High-Current Laboratory of the Institute of Power Engineering. The first construction based on strontium ceramic capacitors and the second one on polypropylene foil capacitors. Low-voltage sections of the both tested dividers were made of polypropylene foil capacitors. The dividers were tested at three different temperatures obtained in a simple climate chamber. During linearity tests in ambient and increased temperatures output voltages of the tested dividers were measured and recorded simultaneously with voltage from reference divider. The results allow to determine the linearity of the divider ratio and its dependence on temperature.*

Keywords: *capacitive voltage divider, ratio of voltage divider, strontium ceramic, polypropylene capacitor*

Mgr inż. Maciej CIUBA – wieloletni pracownik ZWNiKE Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, specjalizuje się w wysokonapięciowej technice probierczo-pomiarowej oraz badaniach osprzętu kablowego.

Mgr inż. Maciej OWSIŃSKI – wieloletni pracownik a obecnie kierownik Laboratorium Wielkopądowego EWP w Instytucie Energetyki Warszawa-Mory, członek PKN w KT nr 53, specjalista z dziedziny badań osprzętu kablowego i osprzętu do linii napowietrznych.

