

doi:10.15199/48.2025.02.48

# Stabilność temperaturowa pojemności w wysokonapięciowych kondensatorach ceramicznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań stabilności temperaturowej przykładowych kondensatorów wysokonapięciowych o różnej geometrii konstrukcji. Badanie obejmowały pomiar prądu upływu, pojemności elektrycznej oraz współczynnika stratności w różnych temperaturach korpusów kondensatorów oraz przy różnych napięciach zasilania.

**Abstract.** This paper presents the results of a temperature stability study of exemplary high-voltage capacitors with different design geometries. The study included the measurement of leakage current, electrical capacitance and loss factor at different temperatures of the capacitor bodies and at different supply voltages. (**Temperature stability of capacitance in high-voltage ceramic capacitors**)

**Słowa kluczowe:** temperatura, kondensator, wysokie napięcie, pojemność elektryczna, współczynnik stratności elektrycznej.

**Keywords:** temperature, capacitor, high voltage, electrical capacitance, electrical loss factor.

## Wstęp

Temperatura otoczenia jest ważnym czynnikiem wpływającym na pojemność kondensatorów wysokonapięciowych. Wysoka temperatura otoczenia powoduje także przegrzanie kondensatorów, skrócenie ich żywotności lub uszkodzenie.

Kolejnym czynnikiem jest rodzaj obudowy, która nie tylko chroni elementy wewnętrzne, ale także znacząco wpływa na efektywność odprowadzania ciepła. Rozmiar obudowy może przyczynić się do kumulacji ciepła wewnątrz kondensatora, co z kolei może prowadzić do wolniejszego odprowadzania temperatury z elementu.

Skutki wzrostu lub spadku temperatury mogą również prowadzić do trwałych zmian wydajności, które determinują wymagania techniczne dla konkretnego typu kondensatora. Charakter zależności pojemności od temperatury zależy głównie od rodzaju krzywej przenikalności elektrycznej  $\epsilon=f(T)$  dielektryka pomiędzy okładzinami. Stała dielektryczna gazów maleje przy wzroście temperatury, ponieważ maleje liczba cząsteczek na jednostkę objętości [1,2]. W przypadku dielektryków ciekłych stała dielektryczna zmienia się w zależności od gęstości cieczy i rodzaju polaryzacji. W niskich temperaturach gęstość cieczy jest duża, co utrudnia przemieszczanie się cząstek pod wpływem pola. Wraz ze wzrostem temperatury maleje gęstość cieczy, wzrasta zdolność polaryzacyjna i wzrasta przenikalność. Jednakże wraz z dalszym wzrostem temperatury przenikalność elektryczna zaczyna spadać, ponieważ ruch termiczny cząsteczek jest utrudniony [1,3].

## Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane z myślą o przeprowadzaniu dokładnych analiz parametrów kondensatorów, które są kluczowe dla ich skutecznego i niezawodnego działania w różnych zastosowaniach elektrycznych. Stanowisko to umożliwia ocenę właściwości kondensatorów wysokonapięciowych ze względu na zastosowany dielektryk, co pozwala na monitorowanie ich wydajności podczas różnych warunków pracy.

Stanowisko składa się z miernika strat dielektrycznych IDP-10 oraz komory grzewczej w postaci cylindra wykonanego z ceramiki piecowej. Miernik IDP-10 przeznaczony jest do pomiarów pojemności i tangensa kąta strat dielektrycznych (oznaczany  $\tan \delta$ ) izolacji urządzeń elektrycznych przy napięciach przemiennych w zakresie (0,4÷10) kV. Jego funkcje umożliwiają dokładne określenie tych parametrów, co jest kluczowe dla diagnostyki i oceny jakości izolacji międzyokładzinowej w różnorodnych

zastosowaniach elektroenergetycznych. Dodatkowo miernik umożliwia pomiar prądu upływu przez dielektryk, co znacznie ułatwia identyfikowanie, analizę i naprawę wszelkiego rodzaju usterek czy nieprawidłowości w działaniu układów izolacyjnych kondensatorów oraz innych elementów wysokonapięciowych. Błąd pomiaru pojemności według producenta miernika wynosi: pojemności  $\pm(0,5 \text{ pF})$ , a  $\tan \delta \pm(5 \cdot 10^{-4} + 0,05 \tan \delta)$ . Podane wartości błędów odnoszą się do temperatury  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

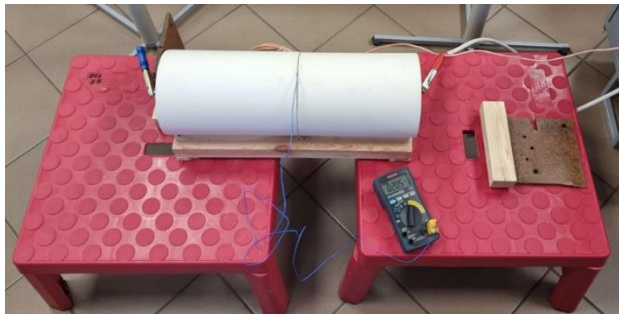


Rys. 1. Miernik IDP-10.

Komora grzewcza została wykonana z ceramiki piecowej  $\text{MgO}$ , która jest materiałem o dobrych właściwościach izolujących termicznie oraz dużej odporności na wysokie temperatury. Komora grzewcza została wykonana z dwóch cylindrów, które zostały ułożone równolegle do siebie. Wewnątrz komory zainstalowano termoparę do pomiaru temperatury wnętrza, w którym umieszczony jest badany kondensator.

Wykorzystanie ceramiki w formie dwóch cylindrów pozwala na równomierne rozprowadzenie ciepła wewnątrz

komory, co jest kluczowe dla skutecznego i jednolitego podgrzewania badanego obiektu. Dodatkowo, ceramika zapewnia stabilność konstrukcji, co ma istotne znaczenie szczególnie podczas długotrwałych procesów grzewczych [8,10].



Rys. 2. Komora grzewcza z termoparą

Ściany komory zostały wykonane z płytek bakelitowych o grubości 5 mm, co zapewnia podwyższoną odporność na temperatury oraz doskonałe właściwości izolacyjne.

### Badane kondensatorów ceramicznych

W artykule przedstawiono wyniki badań dwóch kondensatorów ceramicznych: LCC WA04H oraz DRALORIC R85TC. Kondensatory tego rodzaju są szeroko stosowane w wysokonapięciowych układach urządzeń radiowych.

Wykonane są z materiału ceramicznego, który pełni rolę dielektryka, umożliwiając uzyskanie dużych pojemności przy stosunkowo małych wymiarach. W obu przypadkach badanych kondensatorów ceramicznych materiał, który został zastosowany do produkcji kondensatorów jest to ceramika klasy COG. Ceramika ta charakteryzuje się najmniejszymi zmianami pojemności w zależności od temperatury [4,5].

Ceramiczna obudowa chroni elementy wewnętrzne oraz znacząco wpływa skutki zmian temperatury kondensatora, które mogą również prowadzić do trwałych zmian wydajności, które determinują wymagania techniczne dla konkretnego zastosowania układowego kondensatora.

Dielektryki zastosowane w badanych kondensatorach charakteryzują się wysoką odpornością na temperaturę i wywołane nią procesy starzeniowe [2,6]. Stabilność pojemności uznawana jest za bardzo dobrą. Zmiany pojemności w funkcji temperatury dla typowych kondensatorów wynosi poniżej  $\pm 20\%$  w zakresie temperatur  $(-55^{\circ}\text{C}+95^{\circ}\text{C})$ . [7]

Typowe wartości rezystancji dielektryków COG stosowane w kondensatorach wysokonapięciowych odniesione do pojemności zawierają się w zakresie  $(10\text{M}\Omega+500\text{M}\Omega)/\mu\text{F}$ . Dielektryki z grupy COG charakteryzują się również wysoką stabilnością zmian rezystywności w czasie [3,8]. Podawane przez producenta wielkości zmian pojemności związane ze starzeniem czasowym dielektryka wynoszą poniżej 0,1%. Jednak producent zaleca eksploatację w warunkach suchych inaczej trwałość może się znacznie skrócić (do 15 lat). Podawana przez producenta histereza zmiany pojemności dla ceramiki COG (NP0) ma wartość pomijalną i wynosi mniej niż  $\pm 0,05\%$ .

Kondensatory wysokonapięciowe z reguły pracują wewnątrz obudów urządzeń elektronicznych, same kondensatory zazwyczaj nie są osłonięte. Powoduje to pewną wrażliwość na zanieczyszczenia powierzchni dielektryków. Należy zwracać uwagę na zanieczyszczenia pyłowe, stałe oraz zawilgocenie powierzchni dielektryka. Każdy z tych czynników pogarsza rezystywność i  $\tan \delta$

użytego materiału dielektrycznego [3,8,9]. Wskazana jest okresowa kontrola tangensa strat dielektrycznych izolacji międzyokładzinowej, który dla typowych kondensatorów wysokonapięciowych typu COG powinien być mniejszy niż 0,0012.

Tabela 1. Dane katalogowe kondensatora ceramicznego LCC WA04H.

Dane katalogowe	Wartość
Firma	LCC
Model	WA04H
Pojemność	110 pF
Tolerancja	+/- 5%
Napięcie znamionowe (UN)	6 kV

Tabela 2. Dane katalogowe kondensatora ceramicznego DRALORIC R85TC.

Dane katalogowe	Wartość
Firma	DRALORIC
Model	R85TC 020080
Pojemność	400 pF
Tolerancja	20%
Napięcie znamionowe (UN)	8 kV



Rys. 3. Kondensator ceramiczny płytkowy LCC WA04H 110 pF



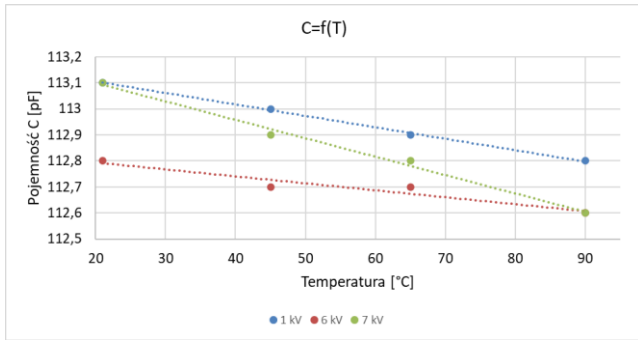
Rys. 4. Kondensator ceramiczny płytkowy DRALORIC R85TC 400pF

### Pojemność kondensatora

Badania zostały przeprowadzone dla kilku wartości napięcia zasilania (50 Hz) przy wzrastającej temperaturze otoczenia od 21°C do 90°C.

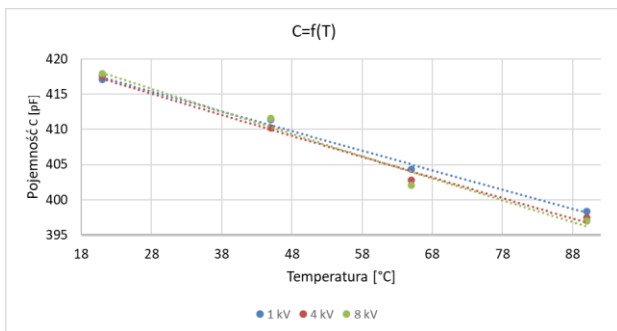
Dla kondensatora LCC zaobserwowano minimalne zmiany pojemności w miarę wzrostu temperatury dla wszystkich wartości napięć. Przy temperaturze 21°C wartości pojemności są sobie zbliżone i wynoszą odpowiednio 113.1 pF, 112.8 pF i 113.1 pF.

Dla kondensatora LCC zaobserwowano minimalne zmiany pojemności w miarę wzrostu temperatury dla wszystkich wartości napięć. Wynosiły one poniżej 1% pojemności znamionowej.



Rys. 5. LCC WA04H 6kV 110pF Przebieg zależności pojemności pod wpływem temperatury

Przy temperaturze 21°C wartości pojemności są sobie zbliżone i wynoszą odpowiednio 113,1 pF, 112,8 pF i 113,1 pF. Przy wzroście temperatury właściwości dielektryczne materiału mogą ulec niewielkim zmianom, wpływając na jego zdolność do przechowywania i przenoszenia ładunku elektrycznego. W miarę wzrostu temperatury do 90°C wartości te nieznacznie spadają do odpowiednio 112,8 pF, 112,6 pF i 112,6 pF.



Rys. 6. DRALORIC 8kV 400pF przebieg zależności pojemności pod wpływem temperatury

W przypadku kondensatora Draloric wartości pojemności zmieniają się bardziej zauważalnie wraz ze wzrostem temperatury dla napięć o wartości 1 kV, 4 kV oraz 8 kV.

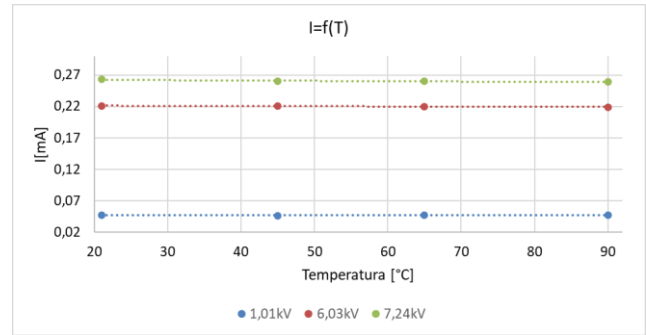
Przy temperaturze 21°C wartości pojemności są sobie zbliżone i wynoszą odpowiednio 417,1 pF, 417,5 pF i 417,9 pF. W miarę wzrostu temperatury do 90°C wartości te znacząco spadają do odpowiednio 398,4 pF, 397,5 pF i 397,0 pF co wskazuje, że wyższe temperatury powodują zmniejszenie rezystywności dielektryka, co skutkuje spadkiem pojemności. Spadek ten wskazuje wpływ temperatury na właściwości dielektryczne kondensatora Draloric, a także na jego większą wrażliwość na temperaturę w porównaniu do kondensatora LCC.

Wysokie temperatury prowadzą do zmian w strukturze krystalicznej dielektryka oraz do zwiększenia strat dielektrycznych, co oznacza, że więcej energii jest tracone w postaci ciepła, a w mniejszym stopniu gromadzi ładunek [10].

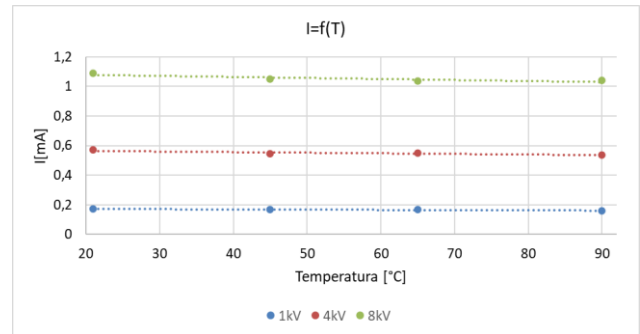
Wyniki badań pojemności w funkcji temperatury otoczenia obydwu kondensatorów pokazują, że temperatura ma istotny wpływ na ich parametry, ale różnice w ich zachowaniu mogą wynikać z konstrukcji lub materiałów użytych do ich wykonania.

### Prąd upływu dielektryka

Przeprowadzono także pomiary prądu upływu w różnych warunkach temperaturowych oraz przy różnych napięciach zasilania. Pomiary zostały wykonane w temperaturach 21°C, 45°C, 65°C i 80°C



Rys. 7. LCC WA04H 6kV 110pF Przebieg zależności prądu upływu pod wpływem temperatury



Rys. 8. DRALORIC 8kV 400pF przebieg zależności prądu upływu pod wpływem temperatury

Wyniki pomiarów prądu upływu pokazują, że prąd rośnie wraz ze wzrostem napięcia, co jest oczekiwanym zachowaniem, ponieważ wyższe napięcie przyczynia się do większej przepustowości elektronów przez dielektryk kondensatora [9,10,11]. W przypadku kondensatora LCC po podgrzaniu kondensatora do temperatury 45°C, prąd upływu nie uległ znacznym zmianom: wynosił 0,046 mA przy napięciu 1,01 kV, 0,221 mA przy 6,03 kV oraz 0,26 mA przy 7,24 kV. Pomimo wzrostu temperatury, prąd upływu pozostał prawie na tym samym poziomie, co sugeruje, że wpływ temperatury na prąd upływu w kondensatorze ceramicznym LCC WA04H w tym zakresie temperatur jest niewielki.

Wyniki badań dla kondensatora DRALORIC pokazują, że w temperaturze 21°C, prąd upływu wynosił 0,172 mA przy napięciu 1 kV, 0,570 mA przy 4 kV oraz 1,088 mA przy 8 kV. Wyniki te wskazują na znaczący wzrost prądu upływu wraz ze wzrostem napięcia.

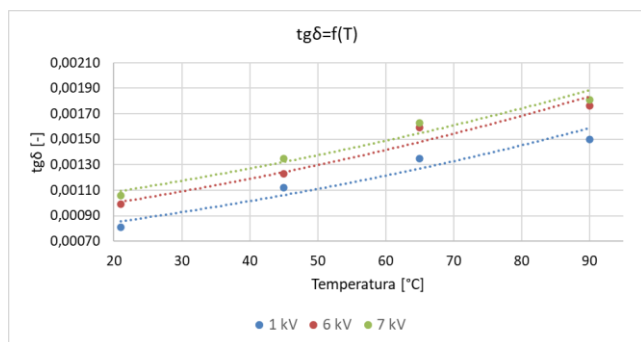
Po podgrzaniu kondensatora do 45°C, prąd upływu nieco się zmniejszył, wynosząc 0,168 mA przy napięciu 1 kV, 0,545 mA przy 4 kV oraz 1,051 mA przy 8 kV. Spadek prądu upływu wraz ze wzrostem temperatury może wskazywać na niewielką poprawę właściwości dielektryka kondensatora w tej temperaturze. W temperaturze 65°C, wyniki były bardzo zbliżone do poprzednich.

Przy najwyższej testowanej temperaturze 90°C, prąd upływu wynosił 0,160 mA przy napięciu 1 kV, 0,538 mA przy 4 kV oraz 1,039 mA przy 8 kV. Wyniki badań kondensatora DRALORIC wskazują, że kondensator ten w wyższych temperaturach charakteryzuje się lepszą stabilnością ze względu na wartość prądu upływu. Wpływ na to może mieć rurkowa konstrukcja kondensatora, która zapewnia dobre warunki chłodzenia dielektryka.

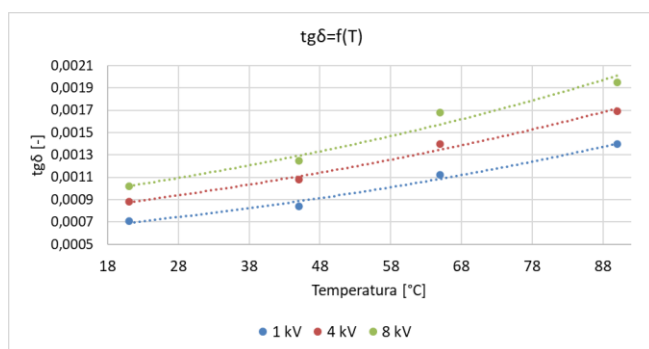
### Współczynnik stratności dielektrycznej kondensatora

Przeprowadzono także badanie zależności współczynnika strat dielektrycznych  $\tan \delta$  dielektryka oraz izolacyjnych elementów konstrukcyjnych kondensatora. W

przypadku wysokonapięciowych kondensatorów dużej mocy straty zależą również od objętości kondensatora, ponieważ niewłaściwe warunki rozpraszania ciepła mogą zakłócić równowagę cieplną kondensatora.



Rys.9. LCC WA04H 6kV 110pF przebieg stratności  $tg\delta$  pod wpływem temperatury



Rys.10. DRALORIC 8kV 400pF przebieg stratności  $tg\delta$  pod wpływem temperatury

Analiza wyników pokazuje, że zarówno wzrost napięcia, jak i temperatury prowadzi w przypadku obydwu kondensatorów do zwiększenia prądu upływu, co objawia się wyższymi wartościami stratności dielektrycznej  $tg\delta$  [12,13, 14,15]. Wzrost prądu upływu z kolei prowadzi do większych strat, co może wpływać na sprawność i trwałość kondensatora. Kondensator DRALORIC wykazuje niższe wartości stratności przy niższych napięciach w porównaniu do LCC. Może to wynikać z różnic w konstrukcji dielektryka oraz materiałach użytych do produkcji obydwu kondensatorów.[16]

### Podsumowanie

Przeprowadzone badania wybranych kondensatorów ceramicznych wysokonapięciowych LCC i DRALORIC pokazują, że wybrane typy tych elementów mają nieco inne właściwości w odpowiedzi na zmiany temperatury i napięcia. Kondensatory ceramiczne, wykazują się dobrą stabilnością parametrów w szerokim zakresie temperatur. Jak pokazały badania kondensator o konstrukcji rurkowej (DRALORIC) miał lepszy współczynnik stratności dielektrycznej niż kondensator dyskowy (LCC). Wpływ na to mogła mógł mieć kształt konstrukcji, który lepiej zapewniał odprowadzanie ciepła wydzielanego w dielektryku. Zwykle kształt kondensatora jest uwarunkowany przez formę dielektryka, która może przyjmować różne postacie, takie jak rurkowa, płaska, perełkowa i wiele innych. Wybór wykonania podyktowany jest bardzo często wytrzymałością mechaniczną masy ceramicznej. Jakość kondensatora, a zwłaszcza jego stabilność, żywotność i dobroć, zależy w dużym stopniu od przylegania metalizowanych elektrod do

dielektryku ceramicznego. Pomiędzy elektrodami a ceramiką nie powinno być pęcherzy powietrznych, zanieczyszczeń i obcych ciał. Sam dielektryk również powinien być pozbawiony pęcherzy i zanieczyszczeń. Wyniki badań potwierdziły informacje producenta zawarte w kartach katalogowych. Badania pokazały też przydatność miernika IDP-10 do badań parametrów kondensatorów wysokonapięciowych.

**Autorzy:** dr inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: bogdan.perka@wat.edu.pl  
inż. Bartłomiej Pyza, absolwent Wydziału Elektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.

### LITERATURA

- [1] Yanping L., Dongmei W., Lianlian G., Daihong L.: Calculation of Temperature Field in Power Capacitor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 5, May 2015.
- [2] Cavalini A., Fabiani D., Mazzanti G.: Models for degradation of self-healing capacitors operating under voltage distortion and temperature," in Proc. ICPADM, Xi'an, China, Jun. 21–26, 2000, pp. 108–111.
- [3] Hapka A.: Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych, *Przegląd Elektrotechniczny* R. 90, NR 9/2014, 33-37.
- [4] Kreczanik P., Venet P., Hijazi A., and Clerc G.: Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, RMS current, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 9, pp. 4895–4902, Sep. 2014.
- [5] Bahrani B., Kenzelmann S., Rufer A.: Multivariable-PI-Based  $dq$  Current Control of Voltage Source Converters With Superior Axis Decoupling Capability, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 7, July 2011.
- [6] Williams S.M., Hoft R.G.: Adaptive frequency domain control of PWM switched power line conditioner, IEEE 1990, CH2853-0/90/0000/0505.
- [7] Suproniuk M., Paś J.: Analiza energii elektrycznej pobieranej w obiekcie użyteczności publicznej, *Przegląd Elektrotechniczny* R. 95 NR 11/2019, 97-100.
- [8] Barnes M., van Hertem D., Teeuwse S.P., Callavik M.: HVDC Systems in Smart Grids, Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 11, November 2017, 2083-2098.
- [9] Rataj D., Tomczewski K.: Badanie wpływu pojemności kondensatora C-Dump na parametry układu napędowego z silnikiem SRM, *Przegląd Elektrotechniczny* R.95, NR 12/2019, 204-207.12/
- [10] Wesołowski M., Skrzypczak P., Hauser J.: Parametry cieplne wpływające na dokładność modelowania procesu nagrzewania indukcyjnego, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2016.
- [11] Gąsiorowski A., Posytek P., Kielbasa P.: Problemy asymetrii napięciowej baterii kondensatorów wielkoczęstotliwościowych stosowanych przy grzaniu indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny* R.94, NR 1/2028, 37-40.
- [12] Cox M.D., Guan H.H.: Vibration and audible noise of capacitors subjected to nonsinusoidal waveforms.
- [13] Jingang H., Shouzhi Z., Gang Y., Hao Ch., Yide W., Tianhao T.: Multiple Harmonic Current Injection System for Audible Noise Analysis of AC Filter Capacitors in Converter Stations, IEEE Vol. 8, 2020, 94028-94032.
- [14] Skibko Z.: Ciepłota stała czasowa parametrem umożliwiającym pełne wykorzystanie obciążalności prądowej przewodu. *Przegląd Elektrotechniczny* 10/2009
- [15] Parler S.G.: Thermal modeling of aluminum electrolytic capacitors, in Proc. IAS, Oct. 3–7, 1999, pp. 2418–2429.
- [16] Białek R.: Stanowisko laboratoryjne do automatycznego pomiaru wybranych charakterystyk przetwornic DC/DC oraz liniowych stabilizatorów napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny* R.98, NR 12/2022, 221-224.