

Przemysław GOŚCIŃSKI\*  
Grzegorz DOMBEK\*  
Zbigniew NADOLNY\*  
Bolesław BRÓDKA\*

## **AUTORSKI UKŁAD DO POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA CIECZY ELEKTROIZOLACYJNYCH**

W artykule opisano autorski układ do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnych. W pierwszym rozdziale uzasadniono wybór tematyki artykułu oraz pracy naukowej. W kolejnym rozdziale opisano ogólną zasadę pomiaru współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnych oraz przedstawiono ogólną koncepcję układu pomiarowego. W rozdziale trzecim przedstawiono pierwsze wstępne wyniki testowe układu, które porównano z danymi literaturowymi. Artykuł został zakończony podsumowaniem.

SŁOWA KLUCZOWE: współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$ , transformator, pole temperaturowe transformatora, ester naturalny, ester syntetyczny, olej mineralny

### **1. WPROWADZENIE**

Ciecze elektroizolacyjne stanowią integralną część transformatora energetycznego. Łącznie z elementami celulozowymi, do których zalicza się przede wszystkim papier transformatorowy, preszpan oraz różnego typu przekładki izolacyjne, ciecz elektroizolacyjna stanowi układ izolacyjny transformatora. Do głównych zadań cieczy elektroizolacyjnych stosowanych w transformatorach należy zapewnienie odpowiedniej izolacji elektrycznej oraz odprowadzenie ciepła powstałego w wyniku przepływu prądu przez uzwojenia i wytworzonego w rdzeniu transformatora. Ponadto, stanowią one barierę ochronną dla wilgoci i powietrza, a także chronią przed wyładowaniami niezupełnymi. Z kolei dzięki impregnacji materiałów celulozowych poprawiają ich wytrzymałość elektryczną [1–3].

Obecnie najczęściej stosowaną cieczą elektroizolacyjną w transformatorach energetycznych jest olej mineralny. Głównym tego powodem jest fakt, iż na

---

\* Politechnika Poznańska.

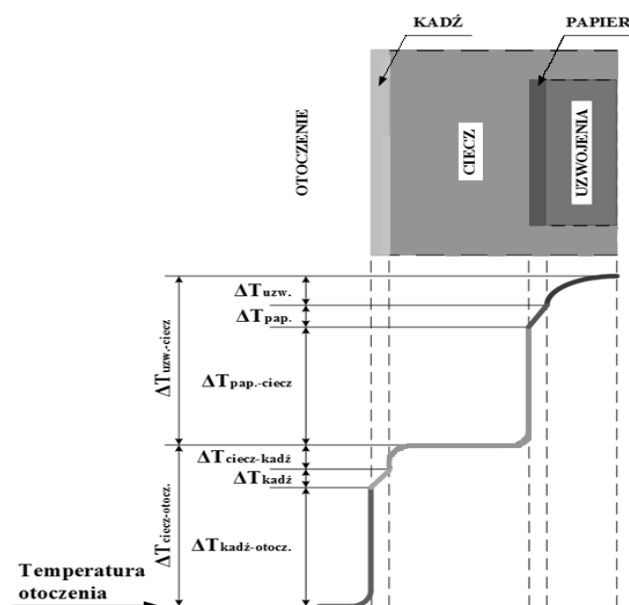
przestrzeni ostatniego wieku udoskonalono proces produkcji olejów mineralnych, które są produktem destylacji ropy naftowej. Z tego powodu olej mineralny jest jedną z najtańszych i najchętniej stosowanych cieczy elektroizolacyjnych. Dodatkowo, jego właściwości materiałowe zostały bardzo dobrze poznane, co umożliwiło konstruktorom zaprojektowanie i zbudowanie transformatorów energetycznych charakteryzujących się bardzo dobrymi konstrukcjami. Jednak coraz to bardziej restrykcyjne przepisy przeciwpożarowe i środowiskowe dotyczące np. biodegradowalności, zmusiły producentów transformatorów energetycznych do szukania alternatywnych dla oleju mineralnego cieczy elektroizolacyjnych, które spełniłyby powyższe wymagania [4, 5].

Alternatywnymi cieczami elektroizolacyjnymi dla oleju mineralnego mogą być estry syntetyczne oraz naturalne. Znajdują one zastosowanie tam, gdzie wymagana jest ochrona środowiska oraz szczególnie wysoki poziom bezpieczeństwa przeciwpożarowego. Związane jest to z ich bardzo dobrymi właściwościami przeciwpożarowymi. Charakteryzują się one, w przeciwieństwie do oleju mineralnego, wysoką temperaturą zapłonu i palenia, Zapewniają tym samym wysoki poziom bezpieczeństwa pożarowego. Dodatkowo, bardzo dobra biodegradowalność estrów oraz niska toksyczność powodują, że w wyniku pojawienia się ewentualnego wycieku praktycznie zanika ryzyko skażenia gleby i wód gruntowych. Właściwości estrów pozwalają również na bardzo dobrą współpracę z izolacją celulozową transformatorów energetycznych. Pomimo szeregu zalet, jakimi charakteryzują się estry naturalne i syntetyczne nie są one tak szeroko stosowane w przemyśle elektroenergetycznym jak olej mineralny. Jednym z tego powodów jest słabe rozpoznanie ich właściwości cieplnych [5].

Do najważniejszych właściwości cieplnych cieczy elektroizolacyjnych można zaliczyć: lepkość kinematyczną  $\nu$ , przewodność cieplną  $\lambda$ , gęstość  $\rho$ , ciepło właściwe  $c_p$  oraz rozszerzalność cieplną  $\beta$ . Wraz ze wzrostem wartości współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ , gęstości  $\rho$ , ciepła właściwego  $c_p$  oraz rozszerzalności  $\beta$  rośnie zdolność cieczy do chłodzenia. Z kolei wzrost wartości lepkości  $\nu$  powoduje obniżenie zdolności cieczy do transportu ciepła. Wymienione właściwości wpływają na współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$ , a tym samym na końcową wartość spadku temperatury między poszczególnymi częściami konstrukcyjnymi transformatora energetycznego [6].

Temperatura uzwojeń oraz układu izolacyjnego jest jednym z najistotniejszych parametrów wpływających na długość eksploatacji urządzenia elektroenergetycznego. Podwyższona, może przyczynić się do spadku rezystancji, spadku napięcia przebicia  $U_p$ , wzrostu współczynnika strat dielektrycznych  $tg(\delta)$ , rozpadu łańcuchów celulozy, wzrostu ciśnienia w kadzi, zagrożenia pożarowego lub do spadku żywotności izolacji transformatora wg prawa 8-miu stopni Montsingera. W związku z tym istotne jest poznanie zjawisk fizycznych wpływających na transport ciepła w transformatorze energetycznym [7, 8].

Transport ciepła w transformatorze energetycznym odbywa się na drodze: źródło ciepła → papier zaimpregnowany cieczą elektroizolacyjną → ciecz elektroizolacyjna → metalowa obudowa → powietrze (rys. 1). Ponieważ ciecz elektroizolacyjna wypełnia wnętrze transformatora oraz nasycza izolację stałą wnika-jąc w jej strukturę, odpowiada ona w znacznym stopniu za transport ciepła. Transport ten zależy głównie od dwóch zjawisk. Pierwsze zjawisko związane jest z przewodzeniem ciepła przez papier zaimpregnowany cieczą, drugie z przejmowaniem ciepła przez ciecz [6].



Rys. 1. Rozkład temperatury w transformatorze z naturalnym chłodzeniem olejowym [7, 8]

Przewodzenie ciepła przez papier zaimpregnowany cieczą elektroizolacyjną związane jest z jego przewodnością cieplną, którą charakteryzuje się przy pomocy współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  papieru. Natomiast zjawisko przejmowania ciepła przez ciecz obejmuje szereg właściwości cieplnych takich jak przewodność cieplna  $\lambda$  cieczy, lepkość  $\nu$ , gęstość  $\rho$ , ciepło właściwe  $c_p$  oraz rozszerzalność cieplna  $\beta$ . Parametrem łączącym właściwości cieplne cieczy i określającym jej zdolność do transportu ciepła jest współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$ . Wzrost współczynnika przejmowania ciepła powoduje wzrost zdolności cieczy elektroizolacyjnej do transportu ciepła.

Na podstawie rysunku 1 można zauważyć, że na całkowity spadek temperatury w transformatorze, na drodze uzwojenia a otoczenie, składają się dwa spadki: spadek temperatury między uzwojeniem a cieczą elektroizolacyjną

$\Delta T_{uzw-ciecz}$  oraz spadek pomiędzy cieczą a otoczeniem  $\Delta T_{ciecz-otocz}$ . Na spadek temperatury między uzwojeniem a cieczą elektroizolacyjną składają się spadki w uzwojeniach  $\Delta T_{uzw}$ , w izolacji papierowej  $\Delta T_{pap}$  oraz spadek pomiędzy izolacją papierową a cieczą  $\Delta T_{pap-ciecz}$ . Z kolei spadek temperatury pomiędzy cieczą a otoczeniem składa się z: spadku temperatury pomiędzy cieczą elektroizolacyjną a kadzią  $\Delta T_{ciecz-kadz}$ , spadku w kadzi  $\Delta T_{kadz}$  oraz spadku pomiędzy kadzią a otoczeniem  $\Delta T_{kadz-otocz}$ . Ostatecznie równania opisujące całkowity spadek temperatury w transformatorze można przedstawić w postaci:

$$\Delta T = \Delta T_{uzw} + \Delta T_{pap} + \Delta T_{pap-ciecz} + \Delta T_{ciecz-kadz} + \Delta T_{kadz} + \Delta T_{kadz-pow} \quad (1a)$$

$$\Delta T = \frac{p_1^2 \cdot q_1}{8 \cdot \lambda_{uzw}} + \frac{p_2 \cdot q_2}{\lambda_{pap}} + \frac{q_3}{\alpha_{pap-ciecz}} + \frac{q_4}{\alpha_{ciecz-kadz}} + \frac{p_5 \cdot q_5}{\lambda_{kadz}} + \frac{P_6}{S_{kon} \cdot \alpha_{pow-kadz}} \quad (1b)$$

gdzie:  $p_1, p_2, p_5$  – grubość: uzwojenia, papieru, kadzi [m],  $q_1$  – objętościowe obciążenie cieplne w uzwojeniach wynikające z strat mocy [ $W \cdot m^{-3}$ ],  $q_2, q_3, q_4, q_5$  – powierzchniowe obciążenie cieplne: wewnętrznej powierzchni izolacji papierowej, zewnętrznej izolacji papierowej, na powierzchni granicznej pomiędzy olejem a kadzią, kadzi [ $W \cdot m^{-2}$ ],  $P_6$  – ciepło odprowadzane z powierzchni kadzi [ $^{\circ}C$ ],  $S_{kon}$  – rzeczywista powierzchnia konwekcyjna [ $m^2$ ],  $\lambda_{uzw}, \lambda_{pap}, \lambda_{kadz}$  – współczynnik przewodności cieplnej dla: uzwojenia, papieru oraz kadzi [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],  $\alpha_{pap-ciecz}, \alpha_{ciecz-kadz}, \alpha_{kadz-pow}$  – współczynniki przejmowania ciepła: między papierem a cieczą, cieczą i kadzią oraz kadzią a powietrzem, [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ].

Pomocnym narzędziem służącym do analizy pola temperaturowego transformatora energetycznego jest symulacja komputerowa. Można ją przeprowadzić zarówno dla modelu 2D jak i dla modelu w 3D. W chwili obecnej popularnym rozwiązaniem jest przeprowadzanie symulacji na modelu trójwymiarowym. Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił ogromny rozwój programów, które mogą być wykorzystywane do symulacji pola temperaturowego transformatora energetycznego. Należą do nich takie programy jak: ANSYS Fluent, SOLIDWORKS Flow Simulation, COMSOL Multiphysic oraz wiele innych [11]. Należy jednak pamiętać, że symulacja komputerowa jest czasochłonna zarówno na etapie wprowadzania geometrii 3D, jak i samych obliczeń. Dodatkowo użytkownik musi posiadać bardzo wydajny sprzęt komputerowy, na którym możliwe będzie efektywne przeprowadzenie symulacji. Należy również zaznaczyć, że konstrukcje transformatorów dużej mocy zazwyczaj różnią się między sobą np. parametrami elektrycznymi. Oznacza to, że każdorazowo przy realizacji zamówienia należałoby przeprowadzić symulację komputerową dla każdej jednostki.

W chwili obecnej w biurach konstrukcyjnych w celu wyznaczenia rozkładu temperatury w transformatorach energetycznych stosuje się uproszczoną procedurę, posługując się zależnościami (1a) i (1b), które zostały wcześniej przedstawione. We wzorach tych przyjmuje się, że współczynniki przejmowania ciepła  $\alpha$  mają taką samą wartość. W związku z tym, że współczynnik przejmowania ciepła

$\alpha$  zależy między innymi od temperatury, długości elementu grzejnego oraz rodzaju cieczy, takie założenie może prowadzić do błędnego wyznaczania temperatury w poszczególnych częściach transformatora. W literaturze przedstawione są również uogólnione wartości współczynnika przejmowania ciepła, często znacznie różniące się od jego wartości rzeczywistej. Ponadto, brakuje danych dotyczących współczynnika  $\alpha$  estrów. Z tego powodu autorzy postanowili wyznaczyć współczynnik przejmowania ciepła cieczy elektroizolacyjnych na podstawie przedstawionego w niniejszym artykule układu pomiarowego.

## 2. OGÓLNA ZASADA POMIARU WSPÓLCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA CIECZY ELEKTROIZOLACYJNYCH ORAZ KONCEPCJA UKŁADU POMIAROWEGO

Współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$  określa zdolność substancji do przejmowania ciepła. Zjawisko przejmowania ciepła polega na wymianie ciepła pomiędzy powierzchnią ciała stałego a omywającą ją cieczą. Strumień przejmowania ciepła można wyliczyć na podstawie prawa Newtona (2) [8, 9].

$$q = \alpha_c \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

gdzie:  $q_l$  – powierzchniowe obciążenie cieplne [ $W \cdot m^{-2}$ ],  $\alpha_c$  – całkowity współczynnik przejmowania ciepła [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ],  $T_2$  – temperatura na powierzchni ścianki [ $^{\circ}C$ ],  $T_1$  – temperatura na cieczy [ $^{\circ}C$ ].

Z kolei, całkowity współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_c$  określony jest zależnością (3).

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_r \quad (3)$$

gdzie:  $\alpha_k$  – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ],  $\alpha_r$  – radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ].

W przypadku cieczy zjawisko przenoszenia ciepła na drodze promieniowania można pominąć. W związku z tym, zależność (2) przyjmuje postać:

$$q = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Ostatecznie po przekształceniu zależności (4) współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$  można obliczyć na podstawie zależności:

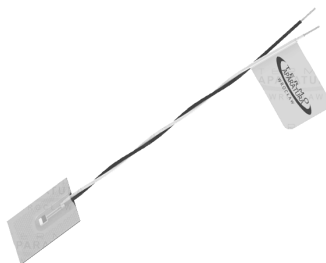
$$\alpha = \frac{q}{(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

Na podstawie tego wyrażenia można stwierdzić, że współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję zależy przede wszystkim od strumienia cieplnego jaki przypada na jednostkę powierzchni, przekazywanego na granicy cieczy i ciała stałego, przy określonej różnicy temperatury powierzchni ciała stałego i cieczy.

Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie układu do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$ . Badana ciecz elektroizolacyjna umieszczona jest w cylindrycznej stalowej kadzi o długości 170 cm i średnicy 8,8 cm. Zainstalowana we wnętrzu kadzi grzałka patronowa o mocy 1500 W i odpowiednim polu powierzchni bocznej  $S$  pozwala na nagrzanie cieczy elektroizolacyjnej do 100 °C. Pozwala to na uzyskanie mocy powierzchniowej grzałki porównywalnej do mocy uzwojeń transformatora, która według literatury równa jest około 2000 do 2500 W·m<sup>-2</sup> [7, 8]. Zdecydowano się na dobór grzałki patronowej dlatego, że umożliwia ona emisję dużej ilości ciepła z niewielkich powierzchni. Budowa elementu patronowego ukierunkowana jest w stronę maksymalnego wykorzystania powierzchni grzewczej dzięki minimalnym strefom martwym oraz umieszczeniu elementu grzejnego bardzo blisko ściany grzałki. Dodatkowo grzałka patronowa zapewnia równomierny rozkład temperatury na jej powierzchni. Budowa grzałki umożliwia jednostronne zasilanie, które upraszcza instalację zasilającą. W celu kontrolowania temperatury grzałki w jej wnętrzu zamontowano czujnik temperaturowy. Temperatura na zewnętrznej powierzchni grzałki oraz na zewnętrznej powierzchni kadzi odczytywana jest dzięki zastosowanemu czujnikowi TOPE500 (rys. 3), składającemu się z rezystora termometrycznego Pt1000, który został umieszczony na samoprzylepnej taśmie teflonowej, oraz rejestratorowi przyłączonemu do komputera.



Rys. 2. Układ do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnej



Rys. 3. Czujnik TOPE500 [12]

Idea wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy została przedstawiona poniżej. Strumień ciepły wytwarzany przez grzałkę patronową o mocy  $P$  i polu powierzchni bocznej  $S$  przepływa przez ciecz elektroizolacyjną, generując spadek temperatury w cieczy  $\Delta T_{ciecz}$ . Pomiar współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnej polega na rejestrowaniu spadku temperatury w ciecz elektroizolacyjnej  $\Delta T_{ciecz}$  oraz mocy głównej grzałki  $P$  podczas ustalonego przepływu ciepła. Temperatura mierzona jest na powierzchni grzałki oraz na zewnętrznej powierzchni cylindrycznej kadzi. Znając wartości wymienionych wyżej parametrów można określić współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$ , który wyznacza się modyfikując zależność (5):

$$\alpha_{ciecz} = \frac{q}{(T_2 - T_1)} \quad (6)$$

$$q = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I}{S}$$

$$\alpha_{ciecz} = \frac{q}{(T_2 - T_1)} = \frac{U \cdot I}{S \cdot (T_2 - T_1)}$$

gdzie:  $S$  – pole powierzchni bocznej grzałki [ $m^2$ ],  $U$  – napięcie [V],  $I$  – prąd [A],  $T_1$  – temperatura na wewnętrznej powierzchni kadzi [ $^{\circ}C$ ],  $T_2$  – temperatura na powierzchni grzałki [ $^{\circ}C$ ],  $P$  – moc grzałki głównej [W],  $q$  – powierzchniowe obciążenie cieplne [ $W/m^2$ ].

### 3. TESTY UKŁADU

#### 3.1. Wyniki testu

W rozdziale zaprezentowano pierwsze wyniki testów układu do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnych. Badaną cieczą był ester naturalny Envirotemp FR3 firmy Cargil.

Przed wykonaniem pierwszych pomiarów należało dokładnie oczyścić układ pomiarowy (wnętrze kadzi). Następnie każdą ustawiono w pozycji pionowej i zalano nowym estrem naturalnym. W celu wyznaczenia spadku temperatury w cieczy  $\Delta T_{ciecz}$  posłużono się dwoma czujnikami temperaturowymi. Jeden z czujników zamontowany został bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni grzałki, natomiast drugi na wewnętrznej powierzchni kadzi. Oba czujniki zostały umieszczone w odległości 5 cm od pokrywy górnej. Podczas wykonywania testów cieplne obciążenie powierzchniowe grzałki wynosiło  $2500 W \cdot m^{-2}$ , co odpowiada mocy powierzchniowej cieplnej uzwojeń transformatora. W celu uzyskania żądanej wartości cieplnego obciążenia powierzchniowego grzałki posłużono się autotransformatorem. Zauważono, że stan ustalony osiągnięto już po około 5 h. Po tym czasie temperatura na zewnętrznej powierzchni grzałki wyniosła

103,9 °C. Z kolei, temperatura na powierzchni zewnętrznej kadzi kształtowała się na poziomie 77 °C. Na podstawie zarejestrowanych wartości temperatury obliczono spadek temperatury w cieczy  $\Delta T_{ciecz}$ . W przypadku estru naturalnego spadek ten wyniósł 26,9 °C. Następnie, korzystając z zależności (5) wyznaczono współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_{ciecz}$ , który wyniósł  $93,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Analizując wyniki testów można stwierdzić, że otrzymany spadek temperatury  $\Delta T_{ciecz}$ , oraz wartość współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha_{ciecz}$  pokrywa się z wyliczeniami współczynnika przejmowania ciepła przedstawionymi w pracach [13, 14]. Świadczy to o właściwym zaprojektowaniu i zbudowaniu układu pomiarowego.

W dalszej pracy naukowej zakłada się wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  w zależności od: położenia kadzi (ułożenie pionowe lub poziome), temperatury elementu grzejnego (zewnętrznej części grzałki), długości elementu grzejnego i rodzaju cieczy (ester naturalny, syntetyczny oraz olej mineralny).

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono autorski układ do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  cieczy elektroizolacyjnych. Uzasadniono wybór tematyki artykułu oraz pracy naukowej. Przedstawiono ogólną koncepcję układu pomiarowego oraz zaprezentowano wstępne wyniki testów, które nie odbiegają od dostępnych danych literaturowych.

#### LITERATURA

- [1] Molenda J., Makowska M., Oleje transformatorowe, eksploatacja–diagnostyka, regeneracja, Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom, 2010.
- [2] Flisowski Z., Technika Wysokich Napięć, WNT, Warszawa, 1998.
- [3] Gacek Z., Wysokonapięciowa technika izolacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1996.
- [4] Rouse T.O., Mineral oil in transformers, „IEEE Electrical Insulation Magazine” 1998, nr 3, t. 14, s. 6–16.
- [5] CIGRE Working Group A2.35, Experiences in service with new insulating liquids, “CIGRE Brochure” 2010, nr 436, s. 6–8.
- [6] Gościński P., Dombek G., Nadolny Z., Bródka B., Analiza współczynnika przejmowania ciepła cieczy elektroizolacyjnych wykorzystywanych, jako izolacja w urządzeniach elektroenergetycznych, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 82, pp. 219–226, 2015.
- [7] Jezierski E., Transformatory. Podstawy teoretyczne, Wydanie III, WNT, Warszawa, 1965.
- [8] Jezierski E., Transformatory, WNT, Warszawa, 1983.
- [9] Wiśniewski S., Wiśniewski T. S., Wymiana ciepła, WNT, Warszawa, 2009.



- [10] Stefanowski B., Jasiewicz J., Podstawy techniki cieplnej, WNT, Warszawa, 1977
- [11] Gościński P., Dombek G., Nadolny Z., Bródka B., Matematyczne modelowanie pola temperaturowego transformatora energetycznego, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, vol. 85, pp. 323–332, 2016.
- [12] <http://www.termoaparatura.com.pl/>, 2017.
- [13] Łopatkiewicz R., Wpływ wybranych czynników na przewodność cieplną izolacji uzwojeń określającą rozkład temperatury w transformatorze, Poznań 2012.
- [14] Dombek G., Wpływ wybranych czynników na właściwości cieplne cieczy elektroizolacyjnych, praca doktorska, Poznań 2016.

#### **AUTHORIAL SYSTEM FOR MEASURING OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THE INSULATING LIQUIDS**

This paper presents a authorial system for measuring heat transfer coefficient  $\alpha$  of the insulating liquids. In the first chapter, the choice of subject matter of article and research work were presented. In the following chapter, the general principles for measuring of heat transfer coefficient of the insulating liquids and the conception of measuring system were shown. In the third chapter, the first testing results of the measuring system were presented, later the authors compared them to literature data. Article ends with summary.

*(Received: 05. 02. 2017, revised: 21. 02. 2017)*