

Brunon SZADKOWSKI

**WPLYW WYBRANYCH
PARAMETRÓW NA WARTOŚĆ
WSPÓŁCZYNNIKA ABSORPCJI
IZOLACJI R_{60}/R_{15}**

Streszczenie. W artykule podjęto próbę wyjaśnienia pewnych anomalii występujących przy testowaniu izolacji transformatorów elektroenergetycznych za pomocą współczynnika absorpcji R_{60}/R_{15} . Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zmian współczynnika absorpcji, spowodowanych zmianami przewodności oraz wymiarów geometrycznych jednego z komponentów układu izolacyjnego, jakim jest izolacja papierowa, a ponadto - wyniki badań wpływu zmian temperatury. Sformułowano wnioski szczegółowe, pozwalające zinterpretować wyniki przeprowadzanych testów izolacji (wraz z ew. anomaliaми), a ponadto - wnioski ogólne, dotyczące stosowania współczynnika absorpcji R_{60}/R_{15} do oceny stanu izolacji transformatorów.

1. WPROWADZENIE

Wyniki uzyskiwane podczas pomiarów współczynnika absorpcji nowych (wyprodukowanych po 1995 r.) i dobrze wysuszonych transformatorów charakteryzują się pewnymi anomaliaми (w stosunku do typowych właściwości wg [4, 6, 7]),

**INFLUENCE OF CHOSEN
PARAMETERS ON R_{60}/R_{15}
INSULATION ABSORPTION
COEFFICIENT VALUE**

Summary. An attempt to explain some anomalies present when testing power transformers by means of the R_{60}/R_{15} absorption coefficient has been made in the paper. Results of simulations of the absorption coefficient changes caused by changes of conductivity and geometric dimensions of the paper insulation have been presented. Moreover, influence of the temperature changes has been discussed. The detailed conclusions enabling to put the proper interpretation on the obtained results (together with possible anomalies) as well as the general conclusions dealing with use of the R_{60}/R_{15} absorption coefficient for transformer insulation condition evaluation have been formulated.

1. INTRODUCTION

The results obtained when measuring the absorption coefficient of new (manufactured after 1995 year) and well dried transformers have some anomalies (in comparison with the typical properties according to [4, 6, 7]), namely:

a mianowicie :

- wartości współczynnika absorpcji są obniżone (np. $< 1,3$),
- następuje wzrost wartości współczynnika absorpcji ze wzrostem temperatury,
- występuje ekstremum (maksimum) współczynnika absorpcji w funkcji temperatury.

W dalszym ciągu, korzystając z przybliżonych modeli matematycznych prądu ładowania izolacji oraz współczynnika absorpcji, przeprowadzono odpowiednie badania symulacyjne w celu wyjaśnienia wspomnianych wyżej anomalii.

2. CHARAKTERYSTYKA PRĄDU ŁADOWANIA (przybliżony model matematyczny)

Wobec braku ścisłego modelu matematycznego układu izolacyjnego transformatora, w celu przybliżonego zorientowania się co i w jakim stopniu decyduje o przebiegu prądu ładowania, można posłużyć się modelem dwuwarstwowego kondensatora (wg Maxwella-Wagnera), w którym prąd ładowania I_{lad} określony jest zależnością [1, 2, 3]:

$$I_{lad} = i_a + i_{ust}, \quad (1)$$

przy czym i_a jest tzw. prądem absorpcji, określonym równaniem

$$i_a = \frac{(e_1\gamma_2 - e_2\gamma_1)^2 d_1 d_2 F U}{(\gamma_1 d_2)(e_1 d_2 + e_2 d_1)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1a)$$

natomiast i_{ust} jest prądem ustalonym, opisanym zależnością

$$i_{ust} = \lambda_1 \gamma_2 \frac{F}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} U, \quad (1b)$$

- the absorption coefficient values are smaller (for instance < 1.3),
- the absorption coefficient value increases together with the temperature rise,
- there is an extremum (maximum) in the function of the absorption coefficient vs. temperature.

The mentioned above anomalies have been explained basing on simulations using the approximate mathematical models of the charging current and absorption coefficient.

2. CHARACTERISTIC OF THE CHARGING CURRENT (approximate mathematical model)

To find out which factors and to what degree decide on the charging current waveform one can use the model of a two-layer capacitor (according to Maxwell-Wagner) because of the lack of the transformer insulation system precise mathematical model. The charging current I_{lad} in this model is given by the relationship [1, 2, 3]:

where i_a is the so-called absorption current expressed by the equation

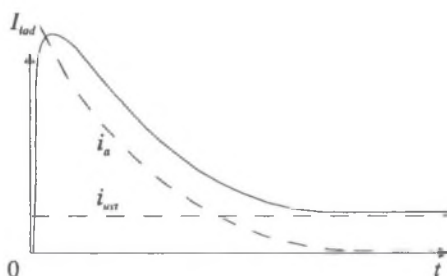
and i_{ust} is the steady-state current given by the formula

gdzie:

ϵ_1, ϵ_2 – względne przenikalności elektryczne, γ_1, γ_2 – przewodności elektryczne, d_1, d_2 – grubości poszczególnych warstw układu izolacyjnego; U – napięcie zasilania, F – powierzchnia elektrod, t – czas, ϵ_0 – bezwzględna przenikalność elektryczna próżni, τ – stała czasowa relaksacji określona równaniem

$$\tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} \quad (1c)$$

Odpowiednią charakterystykę prądu ładowania i jego składowych przedstawiono na rys. 1



Rys. 1. Charakterystyka prądu ładowania i jego składowe

where:

ϵ_1, ϵ_2 – dielectric constants, γ_1, γ_2 – electrical conductivities, d_1, d_2 – thickness of the insulation system particular layers, U – supply voltage, F – surface of the electrodes, t – time, ϵ_0 – permittivity of the free space, τ – relaxation time constant described by

The characteristic of the charging current and its components are shown in Fig. 1.

Fig. 1. Characteristic of the charging current and its components

3. PRZYBLIŻONE RÓWNANIE WSPÓLCZYNNIKA ABSORPCJI

Współczynnik absorpcji k_a definiowany jest jako stosunek prądów ładowania zmierzonych po 15 s oraz po 60 s [3, 4, 6, 7]:

$$k_a = \frac{I_{15}}{I_{60}} \quad (2)$$

Przy stałym napięciu zasilania można zapisać

3. APPROXIMATE EQUATION OF THE ABSORPTION COEFFICIENT

The absorption coefficient k_a is defined as the ratio of the charging currents measured at 15s and 60s instants of time [3, 4, 6, 7]:

For the constant supply voltage one can write

$$k_a = \frac{I_{15}}{I_{60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (2a)$$

Pomiar współczynnika absorpcji k_a wykonywany jest na ogół poprzez pomiar rezystancji, choć mógłby być wykonywany poprzez pomiar prądów ładowania [3, 5, 6].

Po podstawieniu równania (1) do równania (2) otrzymujemy

$$k_a = \frac{I_{15}}{I_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{ust}}{i_{a60} + i_{ust}} \quad (2a)$$

gdzie:

i_{a15} , i_{a60} , i_{ust} – oznaczają odpowiednio prądy absorpcji (po 15 oraz 60 s) oraz ustalony prąd ładowania.

Kompletne równanie współczynnika absorpcji k_a (w funkcji poszczególnych parametrów g , e , d , F , U) otrzymamy po podstawieniu do równania (2b) zależności określających poszczególne prądy (równ. 1a, 1b, 1c).

4. ANALIZA WPŁYWÓW ZMIAN WYBRANYCH WIELKOŚCI (γ_1 , d_1 , temp.)

W dalszym ciągu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zmian charakterystyk prądu ładowania, a także współczynnika absorpcji pod wpływem zmian przewodności oraz grubości jednego z komponentów układu izolacyjnego, jakim jest izolacja papierowa. Ponadto przedstawiono rozważania (i wyniki badań symulacyjnych) dotyczące wpływów zmian temperatury na współczynnik absorpcji k_a .

W przeprowadzonych badaniach korzystano z podanych w p.2 i 3 równań oraz przyjęto następujące wartości parametrów charakteryzujących warstwę rozważanego układu izolacyjnego (por. ANEKS załączony na końcu niniejszego opracowania):

In general, measurement of the absorption coefficient k_a is made by measurement of the resistances, although it could be made by measurement of the charging currents [3, 5, 6].

Substituting Eq.(1) in Eq.(2) one obtains

where

i_{a15} , i_{a60} are the absorption currents at 15s and 60s instants of time, respectively, i_{ust} is the steady-state charging current.

Substituting the relationships (1a, 1b, 1c) determining the particular currents in Eq.(2b) the final form of the equation describing the absorption coefficient k_a (as a function of the particular parameters: γ , E , d , F , U) is obtained.

4. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CHOSEN PARAMETER CHANGES (γ_1 , d_1 , temp.)

The simulation results of changes of the charging current characteristics as well as the absorption coefficient due to changes of the conductivity and thickness of one component of the insulation system, that is the paper insulation, are given in this Section. Also, some considerations (and simulation results) dealing with the influence of temperature changes on the absorption coefficient k_a are presented.

To make the above simulations the equations from Sections 2 and 3 have been used and the following values of the parameters characterising the layers of the insulation system under consideration

have been assumed (compare APPENDIX at the end of this paper):

warstwa „1” – papier

layer „1” – paper

zmienna:

variable:

$$\gamma_1 = 10^{-16}, \underline{10^{-15}}, 10^{-14}, 10^{-13}, 10^{-12}, 10^{-11}, 10^{-10}, 10^{-9} \text{ } 1/\Omega\text{m},$$

zmienna:

variable

$$d_1 = (0,5; 1; 2; \underline{2,5}; 5; 10) \cdot \text{m}, \quad \varepsilon_1 = 2,3,$$

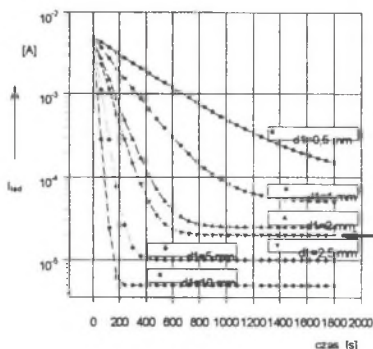
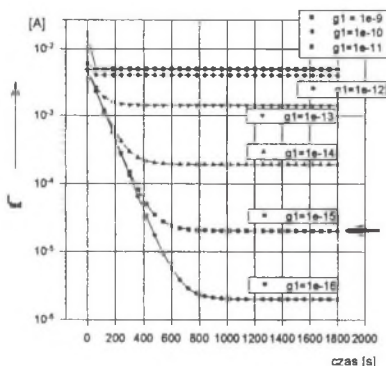
warstwa „2” – olej

layer „2” – oil

$$\gamma_2 = 10^{-11} \text{ } 1/\Omega\text{m}, \quad d_2 = 10^{-1} \text{ m}, \quad \varepsilon_2 = 2,3.$$

a)

b)



Rys.2. Wpływ zmian przewodności g_1 (rys.2a) oraz grubości d_1 (rys.2b) na charakterystyki prądu ładowania

Fig.2. Influence of the conductivity g_1 (Fig.2a) and thickness d_1 (Fig.2b) changes on the charging current characteristics

Uwaga: Parametry 1 warstwy zaznaczone podkreśleniem oraz wszystkie parametry 2 warstwy odpowiadają wartościom rzeczywistego transformatora, dobrze wysu-

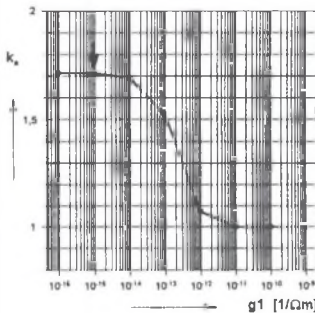
Note: The 1-st layer parameters which are underlined and all the 2-nd layer parameters correspond to those of a real transformer, well dried ($k_a = 1,71$), of the resi-

szego ($k_a = 1,71$), o rezystancji $R_{300} = 250 \text{ M}\Omega$. Przyjęto, że napięcie zasilania $U = 5000 \text{ V}$.

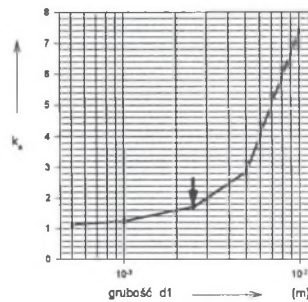
Wpływ zmian przewodności oraz grubości 1 warstwy na prąd ładowania przedstawiono na rys.2 (przewodność zaznaczono tutaj symbolem g_1 , a grubość – symbolem d_1).

Natomiast wpływ zmian przewodności oraz grubości 1 warstwy na wartość współczynnika absorpcji k_a przedstawiono na rys.3.

a)



b)



Rys.3. Wpływ zmian przewodności g_1 (rys.3a) oraz grubości d_1 (rys.3b) na wartość współczynnika absorpcji k_a

Fig.3. Influence of the conductivity g_1 (Fig. 3a) and thickness d_1 (Fig.3b) on the absorption coefficient k_a value

Uwaga: Na rys.2 i 3 zaznaczono strzałkami charakterystyki (lub punkty charakterystyk) odpowiadające parametrom rzeczywistego transformatora ($k_a = 1,71$, $R_{300} = 250 \text{ M}\Omega$).

Temperaturową charakterystykę współczynnika absorpcji $k_a = f(T)$ można określić z równań (2b) oraz (1a, 1b, 1c) przy uwzględnieniu, że występujące w tych równaniach wielkości γ , ϵ , d oraz U i F są

stance $R_{300} = 250 \text{ M}\Omega$. The supply voltage has been assumed to be $U = 5000 \text{ V}$.

The influence of the 1-st layer conductivity and thickness changes on the charging current is shown in Fig.2 (symbol g_1 refers to the conductivity, whereas symbol d_1 refers to the thickness).

On the other hand, Fig.3 shows the influence of the 1-st layer conductivity and thickness on the absorption k_a coefficient value.

Note: In Figs.2 and 3 arrows indicate the characteristics (or the points of the characteristics) corresponding to the real transformer parameters ($k_a = 1,71$, $R_{300} = 250 \text{ M}\Omega$).

The temperature characteristic of the absorption coefficient $k_a = f(T)$ can be determined basing on Eqs. (1a, 1b, 1c, 2b) when taking into account the dependen-

funkcjami temperatury. Ogólnie można zapisać:

$$k_a = f(\gamma, \varepsilon, d, U, F) = f(T). \quad (3)$$

Z doświadczeń wynika, że w przedziale temperatur ($0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C}$, a nawet nieco większym) – zmienność temperaturowa wielkości ε , d oraz U i F jest wyraźnie mniejsza niż zmienność przewodności γ . Wobec tego w dalszym ciągu rozważań przyjęto założenie, że w podanym wyżej przedziale temperatur, wielkości ε , d , U , F są w przybliżeniu stałe. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że ewentualne uwzględnienie temperaturowych zmian wielkości ε , d , U , F wymagałoby określenia odpowiednich równań tych wielkości w funkcji temperatury, co zwłaszcza w odniesieniu do temperaturowej zmienności ε mogłoby być kłopotliwe.

Równanie przewodności izolacji γ w funkcji temperatury, dla większości materiałów izolacyjnych (w rozważanym przedziale temperatur $0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C}$), określone jest zależnością [3]:

$$\gamma_{(T)} = \gamma_{(T_0)} \exp[c(T - T_0)], \quad (4)$$

przy czym na ogół $c = 0,02 \div 0,1$, natomiast $\gamma_{(T_0)}$ jest przewodnością w temperaturze odniesienia T_0 (zwykle równej 0° lub 20°C).

Po podstawieniu zależności (4) do równań poszczególnych prądów (1a, 1b, 1c), a następnie po uwzględnieniu tych równań w równaniu (2b) na współczynnik absorpcji k_a otrzymujemy interesującą nas temperaturową zależność współczynnika absorpcji $k_a = f(T)$; zależność ta, mimo przyjętych założeń upraszczających, jest dość złożona i przytaczanie jej nie jest celowe.

Odpowiednie charakterystyki $k_a = f(T)$ przedstawiono na rys.4. Jako pierwszą, na rys.4a przedstawiono charakterystykę „wyjściową”, odpowiadającą parametrom rzeczywistego transformatora, wyznaczo-

cies of the following quantities γ , ε , d , U and F upon the temperature. In general, one can write

From experiments it follows that the temperature change of the is ε , d , U , F quantities considerably smaller than that of the conductivity γ within the temperature range of $0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C}$ (or even a little greater). That is why the quantities ε , d , U , F have been assumed to be constant in the above mentioned temperature range. Here it should be noted that if the temperature changes of the quantities ε , d , U , F were to be taken into account it would be necessary to determine the appropriate relationships between these quantities and the temperature, which could be troublesome, especially for the temperature change of ε . Dependence of the insulation conductivity γ upon the temperature for most insulation materials (within the considered temperature range $0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C}$) is given by the relationship [3]:

where $c = 0,02 \div 0,1$ in general, $\gamma_{(T_0)}$ is the conductivity in the fiducial temperature T_0 (which is usually equal to 0° or 20°C).

Having substituted Eq.(4) and Eqs.(1a, 1b, 1c) in Eq.(2b) one obtains the relationship between the absorption coefficient and temperature $k_a = f(T)$, which is complex in spite of the made simplifying assumptions. Therefore it is no use presenting it here.

The characteristics $k_a = f(T)$ are presented in Fig.4. Fig.4a shows the characteristics corresponding to the real transformer parameters which have been determined in different temperatures (compare APPENDIX). The groups of characteristics for different values of the oil and paper

nym w różnych temperaturach (por. ANEKS). Natomiast na rys.4b,c,d przedstawiono różne grupy charakterystyk – dla różnych wartości stałych c_2 i c_1 (por. równ. 4) izolacji olejowej i papierowej. Zmienność stałej c (w przedziale $0,02 \div 0,1$) została przyjęta na podstawie danych literaturowych [3], natomiast z przeliczeń własnych (na podstawie danych przedstawionych w załączonym ANEKSIE) wynika, że zmienność stałej c_2 oleju jest ograniczona do przedziału $0,02 \div 0,06$.

Warto tutaj zwrócić uwagę, że stała c może zmniejszać się ze wzrostem zawilgocenia i zabrudzenia [3], co ewentualnie można by wykorzystać do oceny stanu izolacji.

5. PRÓBA WYJAŚNIENIA NIEKTÓRYCH ANOMALII

- a) Przyczynami zmniejszania się wartości współczynnika absorpcji ($k_a < 1,3$) w rozważanym symulacyjnie modelu 2-warstwowego kondensatora mogą być zarówno zmiany przewodności jak i grubości badanej warstwy (por. rys.3 i 2). Zauważmy, że w stosunku do punktu zaznaczonego na charakterystykach strzałką, dalsze zmniejszanie przewodności g_1 w niewielkim stopniu wpływa na wzrost współczynnika k_a , natomiast zmniejszanie grubości warstwy d_1 – wpływa dość silnie na zmniejszenie wartości współczynnika k_a .

Taka sytuacja może wystąpić w rzeczywistych, nowo wyprodukowanych transformatorach, w których zastosowana została lepsza izolacja papierowa, o mniejszej przewodności i większej wytrzymałości elektrycznej, dopuszczającej np. zastosowanie mniejszych grubości! Wprowadzone ostatnio zmiany w technologii i konstrukcji transformatorów spowodowały zarówno wzrost rezystancji izolacji R_{300} bada-

insulation constants c_2 and c_1 (compare Eq. (4)) are shown in Figs.4b, c, d. Variation of the constant c (within the range 0.02-0.1) has been assumed basing on [3], whereas from the author's calculations (basing on the data given in APPENDIX) it follows that variation of the oil constant c_2 is limited to the range of $0.02 \div 0.1$.

It is worth noting that the constant c may decrease owing to the increase of humidity and dirt [3], which, if necessary, could be used for evaluation of the insulation condition.

5. AN ATTEMPT TO EXPLAIN SOME ANOMALIES

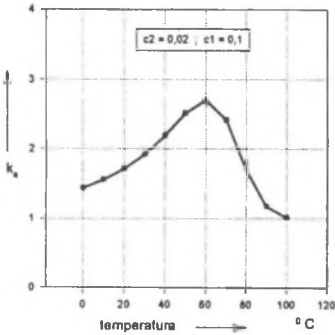
- a) Changes of the conductivity as well as thickness of the tested layer can be the reason of the absorption coefficient value decrease ($k_a < 1.3$) in the simulated model of a 2-layer capacitor (compare Figs.3 and 2). Let us note that decrease of the conductivity g_1 beginning from the point indicated by the arrow on the characteristic in Fig.3a influences slightly increase of the absorption coefficient k_a , whereas decrease of the layer thickness d_1 (beginning from the point indicated by the arrow – Fig.3b) influences significantly reduction of the absorption coefficient value.

Such a situation can occur in case of new-manufactured transformers, in which there has been used paper insulation of smaller conductivity and higher electric strength allowing smaller thickness. The changes introduced in technology and construction of transformers lately have resulted both in increase of the insulation resistance R_{300} of the tested transformers (an ave-

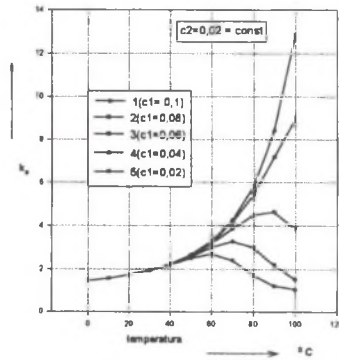
nych transformatorów (przeciętnie o dwa rzędy w skali dziesiętnej), jak i zmiany wymiarów geometrycznych układu izolacyjnego.

rage by two orders in decimal scale) and in changes of the insulation system geometrical dimensions.

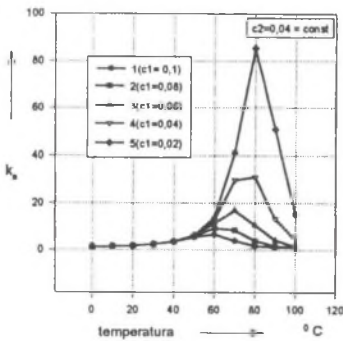
a)



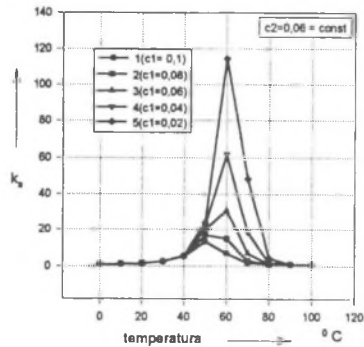
b)



c)



d)



Rys. 4. Wpływ zmian temperatury na współczynnik absorpcji k_a ; (a) – charakterystyka „wyjściowa” odpowiadająca parametrom rzeczywistego transformatora, wyznaczonym w różnych temperaturach (por. ANEKS); (b), (c), (d) – grupy charakterystyk dla różnych wartości stałych c_2 i c_1 (por. równ. 4) izolacji olejowej i papierowej.

Fig. 4. Influence of temperature changes on the absorption coefficient k_a ; (a) – characteristic corresponding to the real transformer parameters determined in different temperatures (compare APPENDIX); (b), (c), (d) – groups of characteristics for different values of the oil and paper insulation constants c_2 and c_1 (compare Eq.(4))

b) Z przedstawionych na rys.4 charakterystyk temperaturowych $k_a = f(T)$ wynika, że w typowym (dla badań wykonywanych w praktyce) zakresie temperatur ($0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C} \dots 90^\circ \text{C}$) mogą występować dwa typowe przebiegi k_a : rosnący ze wzrostem temperatury oraz wykazujący lokalne maksimum (a więc także malejący, po przekroczeniu pewnej temperatury). Zatem opisane w p.1 sytuacje nie powinny być traktowane jako anomalie.

Należy dodać, że według informacji literaturowych [3], podczas badań nad wykorzystaniem charakterystyk $k_a = f(T)$ do oceny stopnia zesterzenia izolacji – w większości badanych przypadków stwierdzono, że lokalne ekstremum charakterystyk $k_a = f(T)$ występuje w izolacjach nie zesterzonych (nowych). Właśnie takie wyniki (występowanie lokalnego maksimum – por. p.1) otrzymano podczas pomiarów nowych transformatorów, a więc byłoby to zgodne z przytoczonymi informacjami literaturowymi.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

W transformatorach wytwarzanych wg nowych technologii (nowoczesne metody suszenia, lepsze materiały, inne proporcje układu izolacyjnego) nie powinno się stosować współczynnika R_{60}/R_{15} (także R_{300}/R_{15}) jako wskaźników oceny stanu izolacji.

Wspomniane wskaźniki wprowadzono do krajowych przepisów wiele lat temu, w odniesieniu do transformatorów wytwarzanych wg dawnych technologii – i dla tych transformatorów współczynnik R_{60}/R_{15} nadal pozostaje wiarygodnym wskaźnikiem oceny stanu izolacji. Dla nowych transformatorów należy podjąć badania mające na celu ustalenie nowych wskaźników będą-

b) From the temperature characteristics $k_a = f(T)$ presented in Fig.4 it follows that two typical waveforms of k_a can occur within the typical temperature range ($0^\circ \text{C} \dots 60^\circ \text{C} \dots 90^\circ \text{C}$) for investigations made in practise, namely: ascending with the temperature growth or having a peak (that is, ascending and then descending from a certain temperature). Therefore the situation described in Section 1 should not be treated as anomalies.

It should be mentioned that, according to [3], a peak of the characteristic $k_a = f(T)$ occurs in non-aged (new) insulation, which has been stated for most cases when investigating use of these characteristics for evaluation of the insulation ageing state. Such results (presence of a peak- compare Section 1) have been obtained when measuring new transformers, so it is in accordance with the mentioned above works.

6. CONCLUDING REMARKS

The coefficient R_{60}/R_{15} (as well as R_{300}/R_{15}) should not be used as an evaluation factor of the insulation condition of transformers manufactured by new technologies (modern drying methods, better materials, other proportions of the insulation system).

The above coefficients were introduced to the state regulations many years ago as the evaluation factors of the insulation condition of transformers manufactured by old technologies and for those transformers the coefficient R_{60}/R_{15} is still a reliable factor of the insulation condition evaluation. However, for new transformers one should make investigations in

cych odpowiednikami dotychczas stosowanych R_{60}/R_{15} (R_{300}/R_{15}). Wydaje się, że najbardziej właściwymi byłyby badania polegające na zdejmowaniu charakterystyk prądów ładowania (dla izolacji o zróżnicowanych stanach, określonych innymi metodami), przy czym czas rejestracji charakterystyk prądowych powinien być wystarczająco długi, tzn. do chwili ustalenia się wartości badanego prądu.

order to establish new coefficients being the equivalents to those having been used up to the present. It seems that investigations consisting in determining the charging current characteristics (for insulation in different conditions, which have been determined by other methods) would be the most appropriate. Yet the recording time of current characteristics should be long enough i.e. until the tested current value is steady.

LITERATURA

REFERENCES

1. Pluciński M.: Polaryzacja warstwowa. Podstawy teoretyczne – Wnioski praktyczne. Rozpr. Elektrotechn., 1959, t. V, z. 3.
2. Pluciński M., Szadkowska T.: Badanie warstwowych materiałów izolacyjnych prądem stałym. Przegląd Elektr., 1967, nr 10.
3. Vajda D.: Issledowanja powreždienij izolacji. Tłum. z węg., wyd. Energija, Moskwa 1968.
4. Jabłoński M.: Badanie transformatorów w przemyśle i eksploatacji. WNT, Warszawa 1969.
5. Szadkowski B., Pasecki E.: Pomiar współczynnika absorpcji R_{60}/R_{15} izolacji transformatorów i maszyn elektrycznych. Z N Pol. Śl. ser. „Elektryka”, z. 156, Gliwice 1996.
6. Norma PN-81/E-04070.03. Transformatory. Metody badań. Pomiar wskaźników izolacji.
7. Warunki techniczne odbioru transformatorów. Energopomiar 1981.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt KUŚMIEREK

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 czerwca 1999 r.

ANEKS

APPENDIX

ZESTAWIENIE TYPOWYCH
WARTOŚCI PARAMETRÓW I
WYNIKÓW POMIARÓW IZOLACJITYPICAL VALUES OF PARAMETERS
AND INSULATION MEASUREMENT
RESULTS**A. Typowe parametry składników izolacji papierowo-olejowej****A. Typical parameters of the paper-oil insulation components**

Papier suchy

Dry paper

$$\epsilon = 2,0 \dots 2,5;$$

$$\gamma = (10^{-16} \dots 10^{-15}) \quad 1/\Omega\text{m}$$

Papier zawilgocony

Humid paper

$$\epsilon = 5,6 \dots 6,6;$$

$$\gamma = (10^{-10} \dots 10^{-9}) \quad 1/\Omega\text{m}$$

Woda swobodna

Free water

$$\epsilon = 80;$$

$$\gamma \geq 3,3 \cdot 10^{-7} \quad 1/\Omega\text{m}$$

Olej mineralny

Mineral oil

$$\epsilon = 2,1 \dots 2,9;$$

$$\gamma = (10^{-13} \dots 10^{-11}) \quad 1/\Omega\text{m}$$

B. Parametry próbki 2-warstwowej jako odpowiednika rzeczywistej izolacji o danych**B. Parameters of the 2-layer sample as an equivalent of the real insulation with the following parameters**

$$R_{\text{out}} = 250 \text{ M}\Omega, \quad \tau = 90 \text{ s}, \quad k_a = 1,71.$$

$$\gamma_1 = 10^{-15} \quad 1/\Omega\text{m}, \quad d_1 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad \epsilon = 2,3$$

$$\gamma_2 = 10^{-11} \quad 1/\Omega\text{m}, \quad d_2 = 10^{-1} \text{ m}, \quad \epsilon = 2,3$$

$$U = 5000 \text{ V}, \quad F = 10^4 \text{ m}^2.$$

C. Przykładowe wyniki pomiarów izolacji rzeczywistych transformatorów

C. Exemplary results of the real transformer insulation measurements

	20°C	30°C	40°C	50°C	90°C
R_{300} [GΩ]	22 9 –	16 5 75	13 4 50	8 3 24	
γ_{oleju} [1/GΩ] (wartości średnie) (mean values)	–	–	–	$0,55 \cdot 10^{-12}$	$0,63 \cdot 10^{-11}$
R_{15} [GΩ]	15,8 20,4 4,42	–	–	3,6 12,5 0,85	
R_{60} [GΩ]	16,2 20,9 5,77	–	–	4,45 14,75 1,25	
R_{60}/R_{15}	1,03 1,02 1,31		–	1,24 1,18 1,47	
wartości dopuszczalne, minimalne admissible, minimum values	(1,3...1,5)	1,2	1,1...1,4		