



PUBLIKÁCIA TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH

# STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

September 2008

Číslo 4/2008

ISSN 1337-0103

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Jaroslav Lelák, Michal Váry<br><a href="#">Slow dielectric polarisation processes in thermoplastic insulating materials</a> .....                          | 3  |
| Jaroslav Lelák, Vladimír Ďurman, Ján Budaj<br><a href="#">Study of the dielectric properties of flame retardant insulation during thermal ageing</a> ..... | 6  |
| Pavol Šandrik, Attila Kment<br><a href="#">Stav korónovej ochrany statorového vinutia generátorov</a> .....  | 9  |
| Roman Cimbala<br><a href="#">Vplyv tlakových pomerov na kapacitu a činiteľ dielektrických strát v izolačnom materiáli</a> .....                            | 11 |
| Iraida Kolcunová, Roman Cimbala, Juraj Kurimský<br><a href="#">Pozorovania čiastkových výbojov v modeli statorovej izolácie</a> .....                      | 13 |
| Bystrík Dolník<br><a href="#">Vplyv kombinovaného elektrického a tepelného namáhania na elektrické vlastnosti varistorov vyrobených na báze ZnO</a> .....  | 16 |
| Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník<br><a href="#">Laboratórny výskum výbojovej činnosti v modeloch s kombinovanou izoláciou papier-olej</a> .....    | 18 |
| Jaroslav Petráš, Jaroslav Džmura, Jozef Balogh<br><a href="#">Analýza signálov získaných z merania akustickej emisie čiastkových výbojov</a> .....         | 21 |
| Dušan Medveď, Jaroslav Petráš<br><a href="#">Vyšetrovanie rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní vzoriek</a> .....                               | 24 |
| Pavel Kaláb<br><a href="#">Efektívnosť diagnostiky izolácie elektrických strojů</a> .....  | 27 |



Jaroslav Leľák, Michal Váry

Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology,  
Department of Electrotechnology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1, Slovakia

## Slow dielectric polarisation processes in termoplastic insulating materials

**Abstract.** Modern measurement systems allow the acquisition of dielectric relaxation spectra over a wide range in frequency and temperature with a high accuracy. This paper presents application of low frequency dielectric spectroscopy measurement in purpose of study slow polarisation processes in PVC insulating cable systems and changes of these processes activated by thermal ageing.

**Keywords:** dielectric, polarisation, insulation material, dielectric spectroscopy

### Introduction

Dielectric relaxation spectroscopy (DRS) became popular and powerful technique for studying the relaxation dynamics of almost any kind of polar or polarised material. The principle is the action of electric field on electric dipole and the response to this action. Owing to the progress in electronic instrumentation, modern measurement systems allow the acquisition of dielectric relaxation spectra over a wide range in frequency and temperature with a high accuracy. Figure 1 shows various techniques in the frequency range from  $10^{-6}$  Hz to  $10^{15}$  Hz [1].

This paper is focused on investigation of slow polarisation processes in the frequency range from  $10^{-3}$  to  $10^{+2}$  Hz. According to fig. 1 the suitable DRS techniques are dielectric response in time domain and frequency analysis. The first mentioned is based on estimation of dielectric response function from polarisation and depolarisation currents measurement data and its transformation to frequency domain by means of Hamon approximation. This approach generally gives credible results only for approximation of imaginary complex dielectric susceptibility part. Therefore presented results are product of frequency analysis application, time consuming approach, providing applicable outputs for both real and imaginary part of complex dielectric permittivity, capacity though.

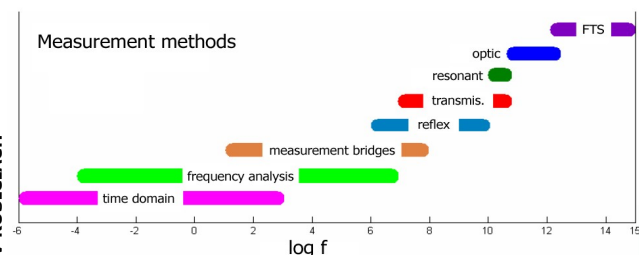


Fig. 1: DRS measurement techniques overview

### Formalisms of dielectric spectra representations

In polymeric materials the response to a mechanical or electrical stimulus is usually expressed in terms of the relaxation or retardation effects that it produces as the material recovers its unperturbed state.

Usual concept of DRS data representation is admittance complex permittivity formalism [2], dielectric constant  $\epsilon'$ , dielectric loss number  $\epsilon''$  and loss tangent  $tg \delta$ , representing the electrical and dielectric properties of measured samples.

$$(1) \quad \epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \frac{Y^*}{i\omega C_0} = \frac{C}{C_0} - i \frac{G}{\omega C_0}$$

where  $Y^*$  is the measured samples complex admittance,  $C_0$  is geometric capacity,  $C$  and  $G$  is measured capacitance and conductance.

Many authors prefer to describe the dielectric properties of devices by using the electric modulus  $M^*$  formalism. Analysis of the complex permittivity data in the  $Z^*$  formalism is commonly used to separate the bulk and the surface phenomena and to determine the bulk dc conductivity of the material [2]. From the physical point of view, the electrical modulus corresponds to the relaxation of the electric field in the material when the electric displacement remains constant. The starting point for further consideration is the definition of dielectric modulus [3]:

$$(2) \quad M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = i\omega C_0 Z^* = M' + iM'' = M_{\infty} \left[ 1 - \int_0^{\infty} e^{-i\omega t} \left\{ - \frac{d\psi(t)}{dt} \right\} dt \right]$$

where the function  $\psi(t)$  gives the time evolution of the electric field within the dielectrics.

The complex modulus was introduced to describe the dielectric response of non-conducting materials. This formalism has been applied also to materials with non-zero conductivity. Advantage of this approach is suppression of conductivity effects in dielectric spectra. This treatment of measured data is used to resolve the viscoelastic  $\alpha$  process from the low frequency rise of  $\epsilon''$ , caused by ionic conduction, in  $M^*$  formalism reduced to conduction peak. If the conductivity is only due to the migration of free ions in the polymer the associated peak will be Debye-like.

$$(2) \quad \tau(T) = \tau_0 e^{\frac{B}{T - T_{VFT}}}$$

where  $\tau_0$  is the pre-exponential factor,  $B$  a constant related to bond rotational barriers and  $T_{VFT}$  the critical temperature at which molecular motions in the materials become infinitely slow.

All these features make it worthwhile to analyze in detail the dielectric spectroscopy data in the  $M^*$  representation in order to extract more precise information from the experimental data as [5]. Application of this treatment will be illustrated on the example of low frequency relaxation processes investigation in PVC based polymeric insulating blends.

**Experimental conditions and results discussion**

Experimental results in this paper illustrate the advantages of application formalism transfer from complex capacitance to dielectric complex modulus. Investigated system subjected to DRS measurement was commercially distributed PVC blend based low voltage cable insulating system H05VV-F 3G1.5, manufactured in Czech Republic, with working conditions: temperature range -15 to +60 °C, rated voltage 300/500 V, with copper core and self-extinguishing special characteristics. Measurement frequency range was  $10^{-3}$  to  $10^{+2}$  Hz, measurement voltage 3,5 V, temperature range from RT to +90°C with  $\pm 0,1$  °C stabilization accuracy.

Figure 2 shows separation of conductance and relaxation component of imaginary part of complex capacity measured experimental data at temperature +80 °C. Figure 3 illustrates corresponding separated relaxation peak of low frequency polarization process. Behavior at elevated temperature was chosen to display the processes in measured frequency range.

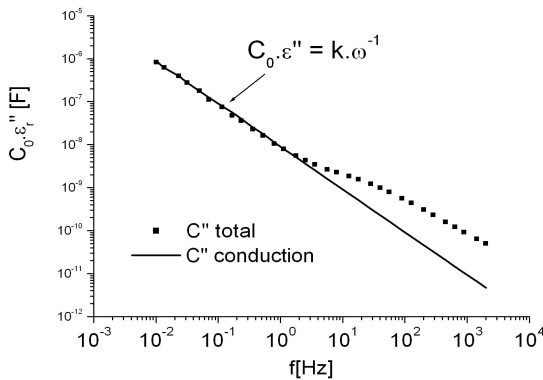


Fig. 2: Separation of conductance and relaxation component of imaginary part of complex capacity measured experimental data at temperature +80 °C.

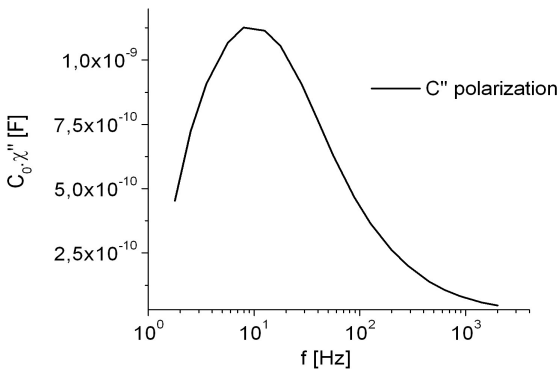


Fig. 3: Separated relaxation peak of low frequency polarization process.

Figure 4 shows separated peak from figure 3 together with  $tg \delta$  frequency dependence corresponding to measured data from figure 2 and shift to the higher frequency range of data converted into complex dielectric modulus formalism.

Figure 5 shows both real and imaginary part of corresponding complex modulus data and superposition of conduction and relaxation peak, where conduction relaxation time  $\tau_c$  can be approximately found at the intersection of curve lines. This figure illustrates good discriminability of relaxation peak in compare with situation in figure 2. Figures 2-5 are obtained at temperature +80°C.

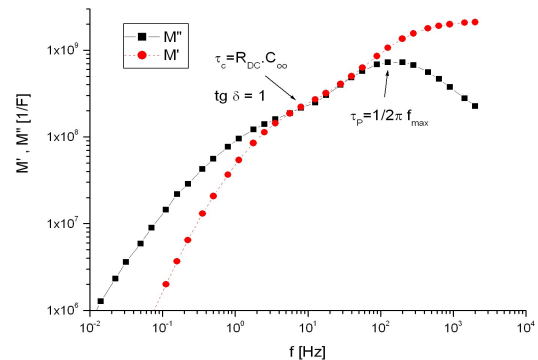
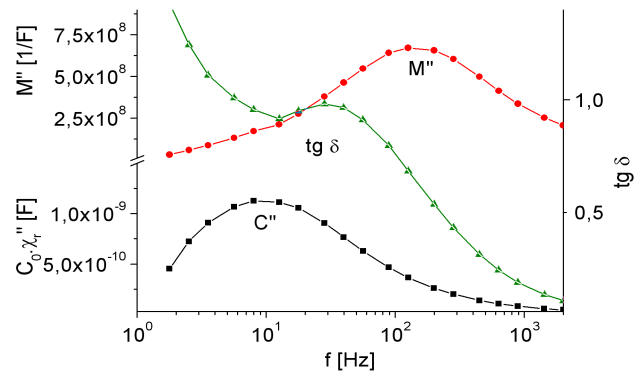


Fig. 4 and 5: Measured data in  $\epsilon''$ ,  $tg \delta$  and  $M''$  formalism

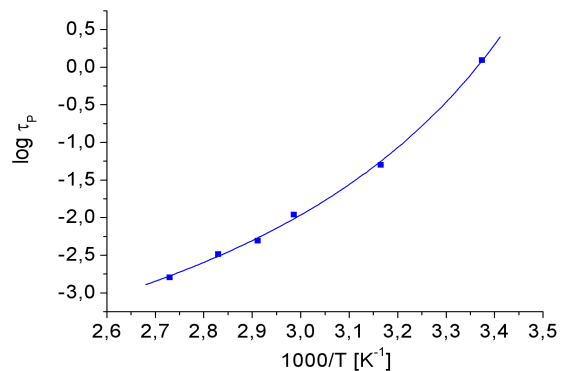
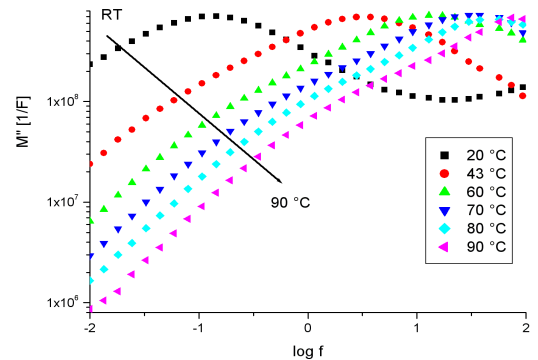


Fig. 6 and 7: Measured data of  $M''$  at various temperatures and VFT fit of relaxation time constant temperature dependence

Finally, sample was exposed to accelerated thermal degradation in elevated temperature + 80 °C for 1286 hours. Results are presented in  $M^*$  formalism, as previous

works shown the suitability of this approach to data evaluation [7, 8]. Figure 8 shows Cole-Cole characteristics in  $M^*$  formalism for measured sample, achieved at room temperature in particular diagnostic cycles. The changes of model parameters are shown on figure 9. It can be stated, that thermal ageing influences the parameters  $\tau$  and  $\alpha$  at first place by decreasing the relaxation time constant value and increasing the  $\alpha$  parameter value. Parameters  $M_S$  and  $M_\infty$  shown just slight fluctuations of its values during the thermal ageing process.

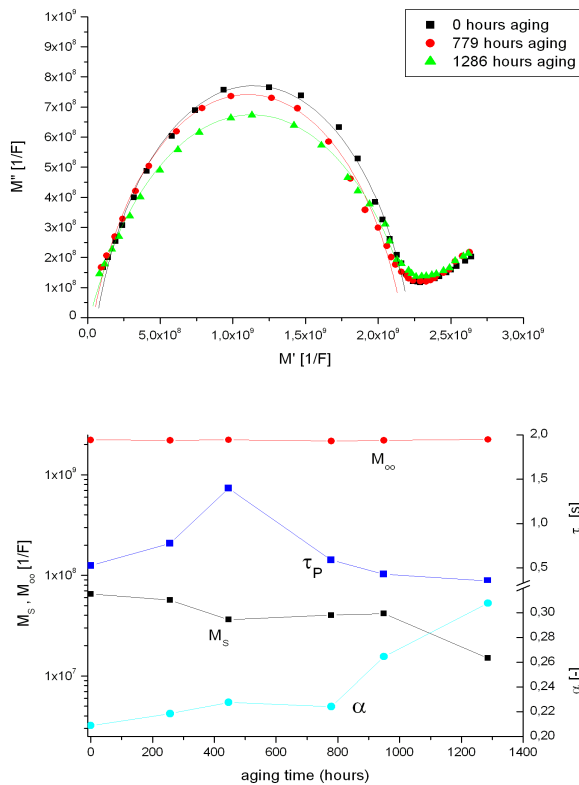


Fig. 8 and 9: Influence of thermal ageing on parameters of Cole-Cole model in  $M^*$  formalism of sample 1 achieved in particular diagnostic cycles at room temperature.

## Conclusion

DRS data presentation in  $M^*$  formalism is worthwhile approach for investigation of conductive dielectric systems especially in the low frequency measurement range and lower measurement temperatures owing to shift of the spectra to the higher frequencies keeping the temperature behavior of relaxation constant. Measurement results shown the shift of the low frequency polarization processes in PVC blend insulated cable samples to the higher frequency range with increased temperature and ageing time. This process can influence operation of these systems at working temperatures in long term point of view.

## References

- [1] Holcman V.: Dielektrická spektroskopie kompozitních soustav, Dizertačná práca (2007)
- [2] Afandiyeva I.M. et al.: Microelectronic Engineering, 85, pp. 247–252 (2008)
- [3] Molak A. et al.: J. Phys. D: Appl. Phys., 38, pp. 1450–1460 (2005)
- [4] Bello A. et al.: Journal of Non-Crystalline Solids, 353, pp. 4283–4287 (2007)
- [5] Cimbala R., Kršňák I., Kolcunová I.: The Computation of Influence of Steady Element on Polarization Spektrum, Journal Acta Polytechnica Prague Vol. 43, No. 2/2003, str.3-9, ISSN 1210-2709
- [6] Bureau E. et al.: European Polymer Journal, 41, pp. 1152–1158 (2005)
- [7] Váry M., Lelák J.: Proceedings of APCOM 2008, pp. 237-241 (2008)
- [8] [Váry M., Lelák J., Kopča M.: Proceedings of DISEE 2008, pp. 223 – 226 (2008)

*This work has been supported by the grant No. 1/4086/07 of the Slovak Grant Agency VEGA and APVV-99-011905.*

## Authors

Jaroslav Lelák, Michal Váry, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Department of Electrotechnology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1, Slovakia.

E-mail: [michal.vary@stuba.sk](mailto:michal.vary@stuba.sk), [jaroslav.lelak@stuba.sk](mailto:jaroslav.lelak@stuba.sk)

Jaroslav Lelák, Vladimír Ďurman, Ján Budaj

Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology,  
Department of Electrotechnology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1, Slovakia

## Study of the dielectric properties of flame retardant insulation during thermal ageing

**Abstract.** The complex permittivity ( $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ ) of the flame retarding cables with combined insulation has been investigated during a long-term thermal ageing. The both parts of  $\varepsilon^*$  were measured in the very low frequency range by using a special instrument made for this purpose. They were also measured with help of the time domain dielectric spectroscopy. The frequency dependences of  $\varepsilon^*$  were compared with those calculated by the Cole - Cole dispersion formula. The dc electrical conductivity  $\gamma_0$  was derived by means of numerical fitting.

**Keywords:** dielectric spectroscopy, very low frequency, Cole – Cole formula, dc conductivity, combined insulation

### Introduction

When performing the accelerated ageing test on a cable insulation it is important to define the criterion of the cable life from the economic point of view as well as from the safety reasons. The basic step in this analysis is an identification of the real operational factors that can influence the cable life. Some of these factors have already been observed. It was found that among the most important factors belong the ones, which affect the cable sheet and consecutive, the cable insulation. The life criterion in this case is a worsening of the core insulation and the loss of reliability.

The internal effects influencing the cable life are usually given by the manufacturer, designer and developer of the cable line. They all can inhibit the undesirable influences. On the other hand, the outer effects (with exception of the maintenance of the cable line) can be inhibited only rarely. Among the most important outer effect belong the physical, chemical and climate changes. They act simultaneously and we cannot eliminate their influence during the construction and developing phase of the cable production. Despite of these uncontrollable influences, we use in practice an estimation of the cable life obtained by the accelerated ageing tests. Obviously, these are the thermal or the thermo-oxidation tests. The ageing criteria are based on the mechanical and electrical properties of the cable insulation. The contemporary polymer materials are commonly projected for 20000 hours of continuous operation at the maximum allowable temperature of the cable core (the standard STN EN 60216).

Diagnostic methods based on the dielectric measurements in the time and the frequency domains are preferably used for investigation of the degradation degree in power cables during their operation. In the frequency domain, the dissipation factor ( $\tan \delta$ ) measurement is frequently used as a diagnostic tool. In the time domain the absorption current or recovery voltage can be measured [1]. From these quantities some derived parameters like polarisation index are calculated for routine cable evaluation. The insulation resistance calculated from the steady-state value of absorption current also belongs to the very important cable characteristics. The parameters acquired by the diagnostic methods mentioned above can individually respond to the changes caused by the long-term operation or the changes induced by artificial ageing. In this paper the measurements of the complex permittivity in the range of very low frequency is used for detecting of

the flame retarding cables degradation caused by a long-term thermal ageing.

### The very low frequency measurements

The complex permittivity in the range of very low frequency can be measured either directly by using a special impedance meter or indirectly with help of the relaxation (absorption) current after a step voltage application. The current density can be evaluated from Maxwell equations [2]. Let  $\gamma_0$  denote the dc dielectric conductivity. After application of a step electric field  $E_0$  at a time  $t=0$  the current density  $i(t)$  is given by

$$(1) \quad i(t) = \gamma_0 E_0 + \varepsilon_0 E_0 \delta(t) + \varepsilon_0 E_0 h(t)$$

where  $\varepsilon_0$  is permittivity of free space,  $h(t)$  is the dielectric response and  $\delta(t)$  is the unit (Dirac) impulse. Dividing (1) by  $E_0$  we get a formal expression for the time dependence of conductivity after application of a step electric field

$$(2) \quad \gamma(t) = \gamma_0 + \varepsilon_0 \delta(t) + \gamma_a(t)$$

The conductivity step response is given by the sum of the steady-state (dc) conductivity, the unit impulse and the absorption conductivity  $\gamma_a$  characterising the dielectric relaxation process. The absorption conductivity is proportional to the dielectric response

$$(3) \quad \gamma_a(t) = \varepsilon_0 h(t)$$

When changing from the time domain to the frequency domain, we use the Fourier transform as follows

$$(4) \quad \varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^\infty \gamma_a(t) \exp(-j\omega t) dt$$

Expression (4) is the basic relationship used for conversion of the dielectric data from the time domain into the frequency domain. The parameter  $\varepsilon_\infty$  here denotes the very high frequency permittivity. After acquiring the dielectric data in the frequency domain, we obviously fit them by a suitable empirical formula. One of the most frequently used is the Cole - Cole one:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} - j \frac{\gamma_0}{\omega \epsilon_0} \tag{5}$$

where  $\epsilon_s$  is the dc permittivity,  $\tau$  is the relaxation time of the polarisation process,  $\alpha$  is the distribution parameter and  $\omega$  is the angular frequency. As it is seen from Eq. 5, the permittivity consists of two contributions – polarisation part and conduction part. Many times one part of the permittivity overlaps the other part and we cannot find precisely all the parameters in Eq. 5. In such cases complex modulus formalism can help to reveal the hidden part [3]. The complex modulus is defined as the reciprocal value of permittivity:

$$m^* = \frac{1}{\epsilon^*} \tag{6}$$

It was proved, that the modulus has formally the same formula as the permittivity. If the parameters of the modulus are known, we can easily calculate the parameters of permittivity.

When performing the dielectric measurements on cables or various electrical equipments, the dimensions of the insulation in the investigated objects are not known. In fact, the equations for permittivity and modulus listed above are still valid with only one small change: we must use the product of  $C_0$  with permittivity instead of permittivity alone in all expressions. Here  $C_0$  is the geometrical capacitance of the object. Also the complex modulus is changed in this notation:

$$M^* = \frac{1}{C_0 \epsilon^*} = M' + jM'' \tag{6}$$

**Experiment**

Four specimens of the length 3 m were used in our experiment. They were cut from two types of flame retardant non-corrosive cables. The first type (assigned as A) was 1-CHKE -V, the second type (assigned as B) was 1-CXKE -V (O). The insulation of the cable A consists of the cross-linked polyethylene, the insulation of the cable B consists of the ethylene interpolymer. The construction details are summarised in Tab. 1.

Table 1 Construction elements of the flame retardant cables

| Construction element    | Cable A  | Cable B   |
|-------------------------|--|---|
| Core                    | Cu, round shape, 1.5 mm <sup>2</sup>   | Cu, round shape, 1.5 mm <sup>2</sup>  |
| Flame retarding barrier | ceramic composite, min. 0.4 mm   | glass-mica tape 0.3 mm, overlapping min. 30 %   |
| Insulation              | cross-linked, flame retarding material (min. 30 % O <sub>2</sub> ), thickness 0.5 mm | thermoplastic, flame retarding material (min. 36 % O <sub>2</sub> ), thickness 0.8 mm |
| Separating layer        | halogen-free   | halogen-free  |
| Filling parts           | impregnated tape   | glass-fibre cloth   |
| Sheath                  | thermoplastic, flame retarding   | thermoplastic, flame retarding  |

The two specimens of the cable A and the two specimens of the cable B underwent a thermal ageing test [4]. They were placed in a thermostat with temperature of 110 °C for 780 hours. The dielectric properties of the specimens were measured at the beginning of the test and also in 120, 252, 384, 516, 648 and 780 hours at temperatures 24, 50, 70, 90 and 110 °C.

The measurements were performed in the frequency domain and also in the time domain. First, the capacitance and the dissipation factor were measured with an impedance meter in the range from 0.1 to 100 Hz at the voltage of 1 V. In the time domain a charging voltage of 100 V was applied to each specimen during the period of 100 s and the absorption current was measured simultaneously with the sampling period of 1 s. For measurements of the absorption current a Keithley 617 electrometer was used with built in source of charging voltage. The measured values of absorption current were transformed to the frequency domain by the discrete Fourier transform [5, 6, 7]. In this way we get the frequency dependence of  $C_0 \epsilon^*$  in the range from 0.01 Hz to 100 Hz.

**Results and discussion**

As it was mentioned above, the dielectric data can be presented in the form of the complex permittivity or the complex modulus. Selected permittivity data for the specimen type A after ageing for 780 hours at 110 °C, measured at 90 °C are in Fig. 1. From this graph we can see just a monotonous increase of both parts of permittivity. An existence of a polarisation process is outlined only by the marked rise of the real part of permittivity. A better picture of the process provides the modulus graph in Fig. 2. The same data as in Fig. 1, but in a different form, show a famous frequency dependence with a point of inflection at the real part of  $M^*$  and the maximum at the imaginary part of  $M^*$ . This form is suitable for finding the parameters appearing in Eq. 5.

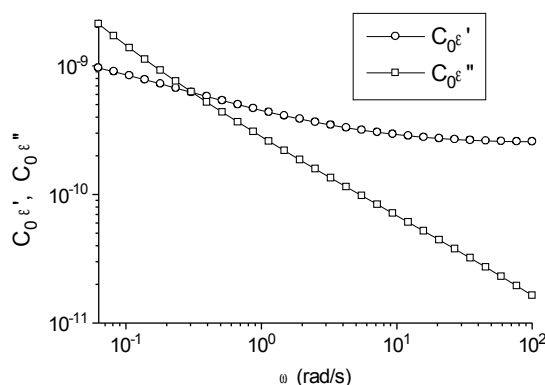


Fig. 1: Plot of permittivity vs. frequency for the specimen type A after ageing for 780 hours at 110 °C, measured at 90 °C

The parameters  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$ , and  $\gamma_0$  were calculated by fitting the values of modulus with the function reciprocal to Eq. 5. The unknown parameters were optimised with help of a Nelder-Mead type simplex search method. Decomposition of the imaginary part of permittivity to the polarisation and conduction part is illustrated in Fig. 3. It must be stated that the process of decomposition was successful only for the data measured at higher temperatures (the temperatures over 70 °C).

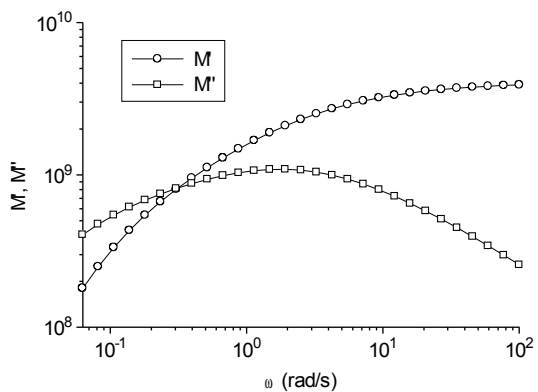


Fig. 2: Plot of modulus vs. frequency for the specimen type A after ageing for 780 hours at 110 °C, measured at 90 °C

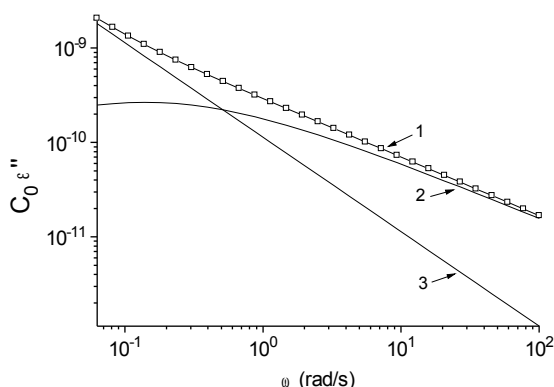


Fig. 3: Decomposition of the imaginary part of permittivity from Fig. 1.: 1-measured values, 2-polarisation part, 3-conduction part

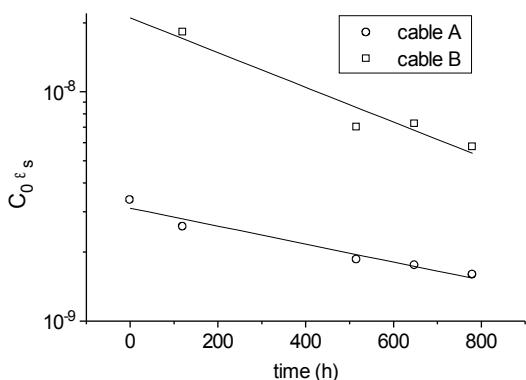


Fig. 4: Variation of the static permittivity calculated at 110 °C during the thermal ageing

After calculating the dielectric parameters we tried to find out which one is the most sensitive to the changes caused by the ageing processes. As the decomposition was effective at higher temperatures, we choose the data measured at 110 °C. The parameters  $\epsilon_{\infty}$ ,  $\alpha$  and  $\gamma_0$  were changed only within the range of measurement and calculation errors. The remaining two parameters are depicted in Figs. 4, 5.

The higher value of the relaxation time and permittivity for the cable B suggests the presence of a slow relaxation process. This process can be either of an interfacial nature or the molecular nature (long chains motion). More information on the process gives us the value of its

activation energy. The energy was calculated from the temperature dependence of relaxation time. It has value of about 0.8 eV. This is comparable with the activation energy of the conduction process (1.1 eV) calculated from the values of  $R$ . Thus we can suppose that the investigated process is determined by the interfaces between the layers of the cable insulation.

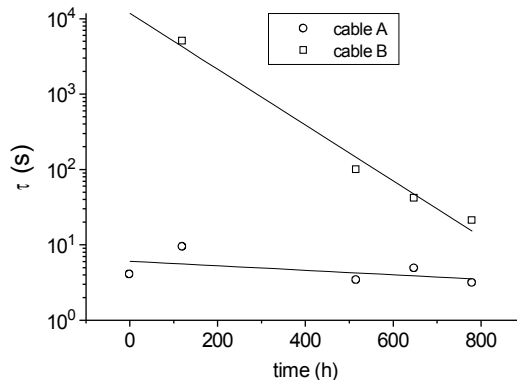


Fig. 5: Variation of the relaxation time calculated at 110 °C during the thermal ageing

**Conclusions**

Decreases of the static permittivity and the relaxation time have been recorded during the ageing of the flame retardant non-corrosive cables. The insulation resistance appears to be independent on the ageing time. According to this result no enhanced risk of the thermal breakdown due to relative high dielectric losses can be expected. The change of polarisation during the ageing is not dangerous for the insulation, as the polarisation maximum is far from the cables service frequency. Anyway, the relaxation time is a good indicator of ageing and it can be use for diagnostic purposes.

**References**

- [1] Zaengl, W. S.: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. Internat. Symp. on HV Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, 2001, pp. 1–10.
- [2] Gáfvert, U.: Dielectric response analysis of real insulating systems. 8th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Toulouse, France, 2004, pp. 1-11.
- [3] Ďurman, V., Olach, O.: Complex modulus formalism in the analysis of dielectric relaxation measurements. Journal of Electrical Engineering, 48, 1997, No. 3-4, pp. 79-81.
- [4] Budaj, J.: Influence of thermal ageing on the dielectric parameters of the cables with combined insulation, Thesis, FEI STU Bratislava, 2008.
- [5] Helgeson, A: Analysis of dielectric response measurement methods and dielectric properties of resin-rich insulation during processing. PhD Thesis, KTH Stockholm, 2000.
- [6] der Houhanessian, V.: Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems, Dissertation No. 12832, ETH Zurich, 1998.
- [7] Semančík, P., Cimbala, R., Kolcunová, I.: Dielectric Analysis of Natural Oils, Acta Electrotechnica et Informatica, č.3 ročník 7, Košice 2007, ISSN 1335-8243, str. 69-73

*This work has been supported by the grant No. 1/4086/07 of the Slovak Grant Agency VEGA.*

**Authors**

Jaroslav Lelák, Vladimír Ďurman, Ján Budaj, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Department of Electrotechnology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1, Slovakia.  
 E-mail: michal.vary@stuba.sk, jaroslav.lelak@stuba.sk, jan.budaj@stuba.sk



Pavol Šandrik, Attila Kment

Katedra elektroenergetiky FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika

## Stav korónovej ochrany statorového vinutia generátorov

**Abstrakt.** Príspevok rozoberá prevádzkový stav zariadenia, defekt izolačného systému, zistený pri pravidelnej údržbe generátora. Ide o miestne zoslabenie izolácie cievok statorového vinutia v oblasti vývodu, pri konci korónovej ochrany. Po popise sledovaného javu sa upriami pozornosť na možnosti jeho odhalenia bez väčších zásahov do konštrukcie zariadenia. Navrhovaný postup sa v závere vyhodnotí na základe sledovanej výbojovej činnosti.

**Abstract.** The contribution analyses an electric generator's service condition, an insulation system's defect found by its regular maintenance. The deal is the insulation system's local weakness of the stator winding's coil connexion, near the end of corona protection. After a brief description of mentioned occurrence, the possibilities of their detection follow. At the close the chosen procedure's interpretation can be found.

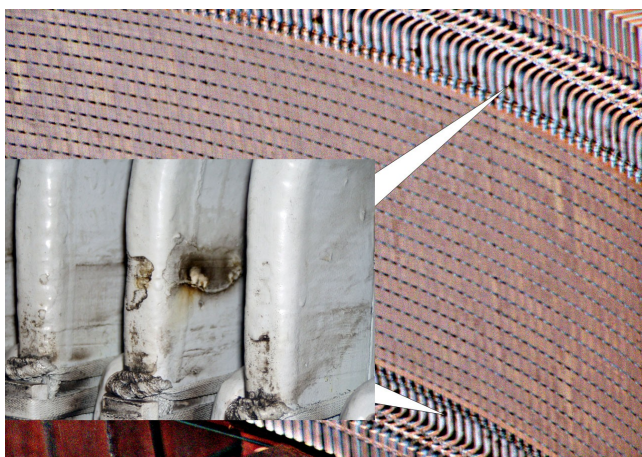
**Keywords:** dielectric spectroscopy, very low frequency, Cole – Cole formula, dc conductivity, combined insulation

### Úvod

Isté poruchy, zvlášť v rannom štádiu, bývajú pri technologických zariadeniach objavené pri rôznych činnostiach, náhodne. Podobné sa udialo i pri čistení izolačného systému jedného zo sledovaných hydrogenerátorov, počas opráv zahŕňajúcich i vyťahnutie rotora z generátora. Pri zbežnej vizuálnej obhliadke vinutia statora boli spozorované miestne zmeny na povrchu izolácie prejavujúce sa miestnym stmavnutím pôvodnej farby izolačného laku.

### Pozorované zmeny

Po dôkladnejšej prehliadke izolačného systému sa zistilo, že miestna zvýšená degradácia izolácie je jav vyskytujúci sa na cievkach v istom kroku od vývodu fázy z generátora, ako to ilustruje obr. 1. Prevádzkovateľ zariadenia sa obrátil na výrobcu s dotazom, do akej miery je tento prejav degradácie nebezpečný z hľadiska zostávajúcej doby života, do akej miery je doba života týmto javom ovplyvnená a ako možno vzniknutý stav vylepšiť, resp. opraviť. Stav bol výrobcom zhodnotený a odporučil sa postup opravy.

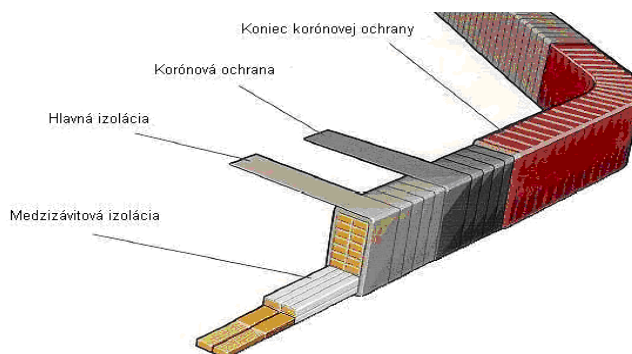


Obr. 1: Situačný obrázok celkový a miestny

### Príčina pozorovaného javu

V miestach kde sa zvýšená degradácia objavila je ukončená korónová ochrana cievky a zvýšené namáhanie, ktoré tento stav spôsobilo, možno považovať za jej príčinu. Vysvetlenie podporuje i fakt, že narušenie cievok sa vyskytuje len pri vývode, kde je potenciál samotného vinutia najvyšší. Smerom k uzlu prejavy narušenia izolácie sa

zoslabujú. Ďalším podporným hľadiskom je, že uvedený jav nebol doposiaľ pozorovaný pri cievkach izolačných systémoch s menovitým napätím do 10,5 kV, ale s vyšším 15,75 kV. Je vysoko pravdepodobné, že príčinou bude pomerne vysoký gradient elektrického poľa na ukončení korónovej ochrany (obr. 2), ktorý sa môže prejavovať korónou v oblasti jej ukončenia a dlhodobým jej degradačným účinkom spočívajúcim hlavne vo zvýšenom tepelnom namáhaní.



Obr. 2: Schéma vývodu cievky statorového vinutia

### Možnosti odhalenia poruchy

Bolo by zaujímavé nájsť možnosť odhalenia takéhoto javu, bez vizuálnej kontroly vinutia spočívajúcej na vybratí rotora. Z rozboru možností monitorovania stavu izolačného systému vyplýva, že relevantným ukazovateľom by mohla byť výbojová činnosť. Metóda ako taká, je schopná reagovať i na miestne zhoršenie stavu a to je práve tento prípad.

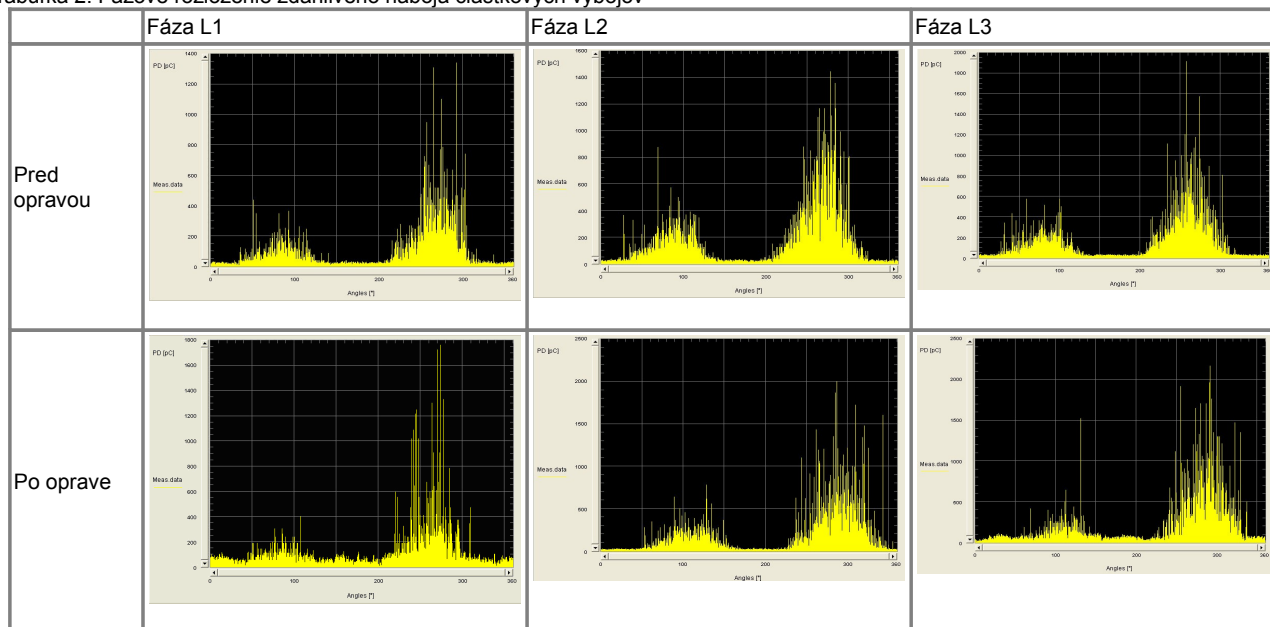
Pre preukázanie vhodnosti postupu a realizácie opravy vzniknutého stavu sa vykonali komplexné dielektrické merania diagnostických parametrov pred realizáciou opravy (tieto sa považovali za východiskové) a po oprave aj so záznamom fázového rozloženia zdanlivého náboja čiastkových výbojov. Zistené zmeny mali monitorovať dôsledky vykonaných opatrení a porovnanie výsledkov malo posúdiť relevantnosť takéhoto postupu [1].

Ako vyplýva z porovnania vtypovaných hodnôt uvedených v tab.1, uvedený postup nespĺňa predpoklady. Tab.2 obsahuje fázové rozloženia zdanlivého náboja čiastkových výbojov meraných pred a po realizácii opravy. Tieto údaje prehľadnejšie zachytávajú sledovanú výbojovú činnosť.

Tabuľka 1: Veličiny charakterizujúce výbojovú aktivitu pred a po oprave

| Fáza | Napätie [kV] | Úroveň výbojovej činnosti [pC] |      | Prúd častkových výbojov [ $\mu$ A] |    |
|------|--------------|--------------------------------|------|------------------------------------|----|
|      |              | pred                           | po   | pred                               | po |
| L1   | 8            | 4500                           | 9000 | 17                                 | 18 |
| L2   | 9            | 4700                           | 8000 | 30                                 | 38 |
| L3   | 9            | 4000                           | 8000 | 26                                 | 38 |

Tabuľka 2: Fázové rozloženie zdanlivého náboja častkových výbojov



Nemožno však konštatovať, že postup je nevhodný z dôvodu, že merania realizované po ukončení opravy boli vykonané na izolačnom systéme, ktorý ešte nebol stabilizovaný, t.j. použité polovodivé, izolačné a ochranné laky ešte neboli vyzreté. Obsahovali zvýšené množstvo vlhkosti a iných prchavých prímiesí, ktoré sa uvedeným spôsobom na výsledkoch meraní odzrkadlili. Bolo by preto vhodné pri najbližšej príležitosti merania zopakovať a vyvodiť záver.

### Záver

Vzniknutá situácia a jej riešenie nie je riešením konečným. Pokiaľ nebudú zmenené intenzity elektrického poľa na konci korónovej ochrany, zvýšené namáhanie bude atakovať okolitú izoláciu a to zvýšenou teplotou a možnou

elektroerozívnu činnosťou. Je preto žiaduce prejavy zvýšeného teplotného namáhania včas objaviť a spraviť aspoň čiastočnú opravu výrobcom doporučeným postupom.

### Literatúra

- [1] Kršňák, I., Kolcunová, I., Cimbala, R.: Development of partial discharges in stator insulation of high voltage rotating machines in dependens of applied voltage. Power and Electrical Engineering, Scientific Proceedings of Riga Technical University, Vol.4, No.11, Riga 2004, Latvia, pp 75-82, ISSN 1407-7345.

### Authors

doc. Ing. Pavol Šandrik, PhD, Ing. Attila Kment, Katedra elektroenergetiky FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika,  
E-mail: pavol.sandrik@stuba.sk, attila.kment@stuba.sk

Roman Cimbala

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Vplyv tlakových pomerov na kapacitu a činiteľ dielektrických strát v izolačnom materiáli

**Abstrakt.** Meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát patrí medzi diagnostické metódy, ktoré sa veľmi často používajú na sledovanie zmien kvality izolačných materiálov v elektroenergetických zariadeniach. Používané materiály sú kompozitné a zložené z niekoľkých vrstiev. Popri elektrofyzikálnych zmenách v ich štruktúre dochádza aj k delaminácii jednotlivých vrstiev a tým k zmenám sledovaných veličín.

**Abstract.** Capacity and dissipation factor measurements are diagnostic methods wide used for quality changes monitoring of insulation material in electric power equipments. Used materials have composite structure. There is delamination process together with electrophysical changes also. (Press influence on capacity and dissipation factor in insulation material)

**Kľúčové slová:** tlak, delaminácia, kapacita, činiteľ dielektrických strát

**Keywords:** press, delamination, capacity, dissipation factor.

### Úvod

Činiteľ dielektrických strát je definovaný ako tangens uhla, o ktorý sa líši fázový posun prúdu skúšaného dielektrika voči ideálnemu dielektriku. Súvisí s polarizačnými a vodivostnými javmi a prejavuje sa zahrievaním materiálu. Na základe zmien v napätových závislostiach je možné usudzovať na zmeny v elektrofyzikálnej štruktúre materiálu, ktoré sú spôsobované hlavne degradačnými procesmi počas jeho starnutia [1], [2].

### Teoretické predpoklady

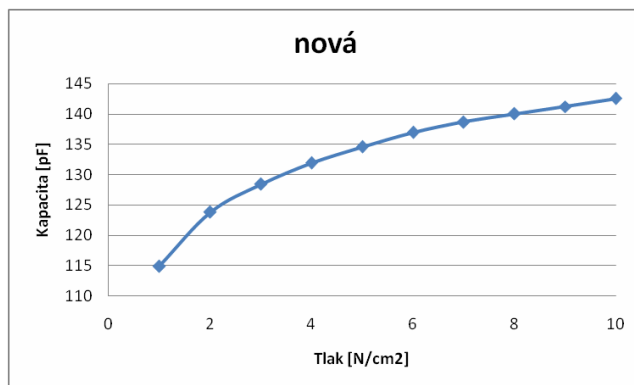
Kľúčovým parametrom pri posudzovaní stavu izolačného systému nie je iba absolútna veľkosť činiteľa dielektrických strát, ale hlavne získanie časových závislostí v definovaných intervaloch počas celej doby prevádzky zariadenia. Platí pritom, že ak sú prírastky záporné, je možné usudzovať na uvoľnenie bočného vyklínovania tyčí v drážkach alebo začínajúce pôsobenie drážkových výbojov. Ďalším významným faktorom je vplyv delaminácie na kapacitu a činiteľ dielektrických strát. Vychádza sa pritom z úvahy, že rozvrstvenie materiálu spôsobuje vznik vzduchom naplnených dutín. Nakoľko vzduch je ideálne dielektrikum, vzniká v tomto prípade seriové radenie kondenzátora s permitivitou izolačného materiálu a ideálneho vzduchového kondenzátora s činiteľom dielektrických strát blízky nule v príslušnej časti objemu. Týmto dochádza k zmene celkovej hodnoty sledovanej veličiny.

### Test

Na našom pracovisku bol vykonávaný test urýchleného tepelného starnutia izolačných materiálov Relanex a Remikaflex. Popri iných sledovaných parametroch boli merané aj hodnoty činiteľa dielektrických strát a kapacity. Počas degradácie bol pozorovaný jav delaminácie a vzniku vzduchom naplnených dutín makroskopických rozmerov (priemer jednotky cm a hrúbka jednotky mm). Na základe toho bol vykonaný experiment zistenia vplyvu tlakových pomerov na oba sledované parametre pri novej vzorke a vzorke zostarutej po vystavení teplote 186°C po dobu 7000 hodín.

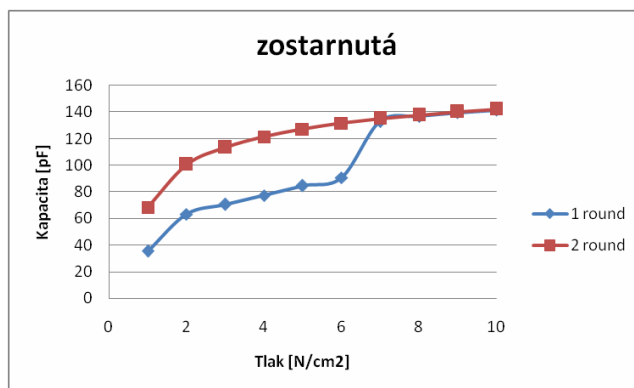
Na meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát bol použitý mostík TETTEX spolu s elektródových systémom umožňujúcim meniť tlak až do hodnoty 10 Ncm<sup>-2</sup>.

Na obrázku 1 je priebeh kapacity novej vzorky bez namáhania.



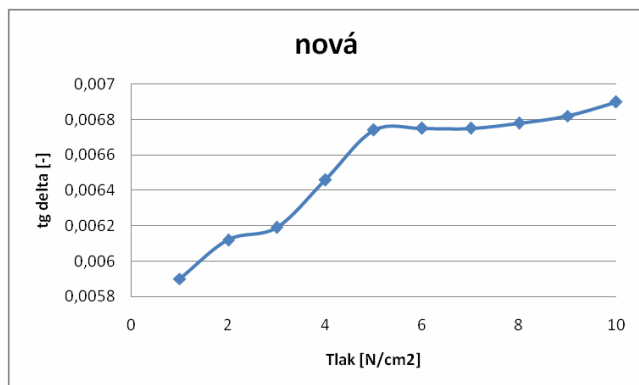
Obr. 1 Kapacita novej vzorky

Následne bol odmeraný priebeh kapacity pri zostarutej vzorke. Na vzorke bol evidentný pokročilý proces delaminácie s dutinou o priemere 54 mm a hrúbke 2 mm. Pri namáhaní vzorky došlo pri zaťažení 7 Ncm<sup>-2</sup> k deštrukcii vzorky a poklesu tlaku. Test pokračoval ďalej. Po prvom teste bolo vizuálnym pozorovaním zistené, že vzduchová dutina zmenšila svoju hrúbku skoro na nulu. Potom bol vykonaný druhý test už so zmenenou dutinou. Výsledok je na obrázku 2.

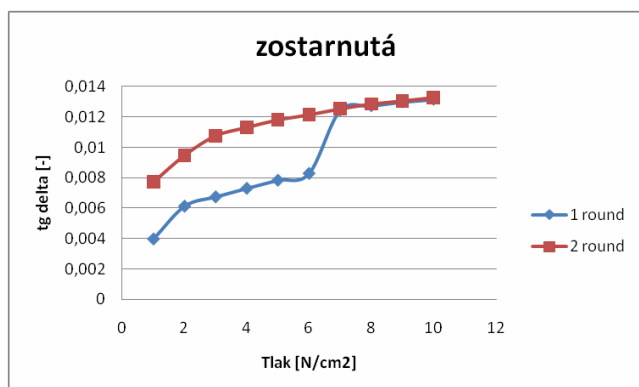


Obr. 2 Kapacita zostarutej vzorky pred a po deštrukcii

Súčasne s kapacitou bolo vykonávané meranie činiteľa dielektrických strát. Za dôležité je možné považovať stabilizáciu hodnoty nenamáhanej vzorky pri zaťažení 5 Ncm<sup>-2</sup>. Priebeh hodnôt je na obrázku 3



Obr. 3 Priebeh činiteľa dielektrických strát novej nenamáhanej vzorky



Obr. 4 Priebeh činiteľa dielektrických strát pri zostarnej vzorke pred a po deštrukcii

Podobne ako pri meraní kapacity je možné sledovať zlom v priebehu hodnôt pred deštrukciou pri zaťažení 7 Ncm<sup>-2</sup>. Pri opakovanom meraní sú hodnoty nad touto hranicou totožné. Hodnoty sú zobrazené na obrázku.

Zistené zmeny v hodnotách kapacity a činiteľa dielektrických strát následne ovplyvňujú aj matematicko – fyzikálne modely elektroenergetických zariadení [3] a je nutné s nimi uvažovať aj pri meniacich sa podmienkach merania v laboratóriu či v prevádzke.

### Záver

Vplyv delaminácie na hodnoty činiteľa dielektrických strát a kapacity bol dokázaný. Zároveň bolo dokázané, že na uvedené veličiny má vplyv tlak, ktorý eliminuje vzduchové dutinky ako sériovo zaradené ideálne dielektrikum v časti objemu. Uvedený jav má vplyv aj na ďalšie diagnostické metódy, medzi ktoré patrí hlavne monitorovanie pôsobenia čiastkových výbojov na izolačný systém[4].

### Literatúra

- [1] Packa, J., Lelák, J., Ďurman, J.: Možný vplyv zrýchleného starnutia na merané dielektrické vlastnosti vysokonapäťových káblov, Medzinárodná vedecká konferencia DISEE 2004, Časť Píla 8.-10.9.2004, str 71-74, ISBN 80-227-2110-7
- [2] Šandrik, P., Zlatovský, J.: Monitorovanie podmienok pri diagnostických meraniach, Konferencia Diagnostika vn a vvn zariadení, 1. KVS spoločnosť s.r.o. Košice 2001, ISBN 80-7099-572-6
- [3] Toman, P.: Simulation of Instrument Transformer Properties in Power Systems, Energyspectrum Journal 2007, Brno ISSN 1214-7044
- [4] Záliš K.: Trendy v diagnostice izolačného systému elektrických strojov točivých, konferencia Technická diagnostika stroju a výrobných zariadení DIAGO 2002, Ostrava 2002 str 482-488, ISBN 80-248-0045-4

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

**Autor:** Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: roman.cimbala@tuke.sk

Iraida Kolcunová, Roman Cimbala, Juraj Kurimský

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky

## Pozorovania čiastkových výbojov v modeli statorovej izolácie

**Abstrakt.** Počas prevádzky elektrických strojov točivých dochádza v dôsledku elektrických, mechanických, tepelných a iných namáhání k vzniku čiastkových výbojov v statorovej izolácii. K takým výbojom patria výboje po povrchu izolácie na čelách vinutí alebo pri výstupe cievky z drážky statora, výboje v drážke statora a vnútorné výboje. Je veľmi dôležité podľa výsledkov meraní rozoznať typ čiastkových výbojov. Za tým účelom bol vyhotovený model statora s tromi drážkami. Do každej drážky je možné vkladať dve vysokonapäťové cievky na ktorých sa robí meranie čiastkových výbojov. Výbojová činnosť zároveň je kontrolovaná aj akustickou sondou na presne určenie miesta vzniku čiastkových výbojov. Výsledky meraní prispievajú k rozpoznávaniu zdroja výbojovej činnosti v statorovej izolácii.

**Kľúčové slová:** elektrický stroj, statorová izolácia, vn cievka, drážka statora, čiastkové výboje, starnutie, degradácia

### Úvod

Meranie úrovne zdanlivého náboja čiastkových výbojov patrí k používaným nedeštruktívnym diagnostickým metódam pre posúdenie stavu izolačných systémov energetických zariadení. Prax poukázala na to, že viac ako aktuálnu úroveň čiastkových výbojov je užitočné sledovať rozvoj parametrov výbojovej činnosti v určitých časových intervaloch, alebo aj nepretržite počas prevádzky, ak to je možné. Štúdium trendov napomáha k odhaleniu skokových alebo aj postupných degradačných zmien v elektrickej izolácii a lepšie odhadnúť ich ďalší vývoj. Toto všetko má význam pri plánovaní údržby a ďalšej prevádzky zariadení. Problematika sledovania trendov sa začína získavaním počiatočných hodnôt. Tieto sú užitočné pri tzv. typovom posudzovaní zariadení. Takmer ideálnym prípadom je, keď sa trend rozvoja parametrov aktivity čiastkových výbojov sleduje od úplného počiatku prevádzky [1].

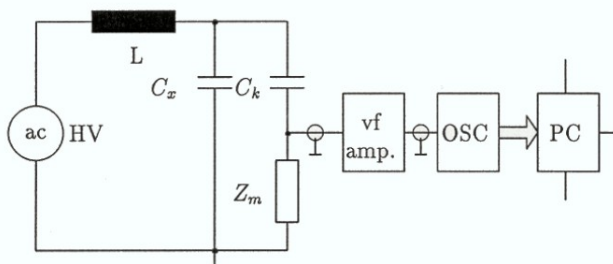
Na komplexné posúdenie vplyvu čiastkových výbojov na celkový stav izolačného systému je potrebná určitá skúsenosť, ktorá zohľadňuje súčasný efekt niekoľkých faktorov ovplyvňujúcich fyzikálne a chemické procesy v materiály izolácie aj v samotnej konštrukcii stroja. Sú to najmä: typ stroja, napäťová hladina a spôsob prevádzky, typ izolačného média, teplotné a tlakové pomery, atď. Množstvo užitočných informácií je možné navyše získať aj z meraní na modeloch jednotlivých prípadov. Po skúsenostiach získaných počas množstva diagnostických meraní v praxi, bol vytvorený špeciálny model výseku statora točivého stroja s tromi drážkami, do ktorých bolo možné vkladať vysokonapäťové cievky. Úlohou bolo získať počiatočné parametre aktivity čiastkových výbojov.

### Experiment

Merania boli uskutočnené v laboratórnych podmienkach na cievke statora elektrického stroja, dimenzovanej pre napäťovú hladinu 6 kV, ktorá bola vyhotovená špeciálne pre účely merania. Na cievku bola aplikovaná vodivá ochrana na zabránenie vzniku výbojov v drážke statora. Za účelom sledovania rozvoja výbojovej činnosti pri výstupe cievky z drážky statora, polovodivá ochrana na povrch cievky nanosená nebola. Priame, galvanické meranie čiastkových výbojov sa uskutočnilo podľa schémy zapojenia uvedenej na obr. 1, t.j. zapojenie uzemneného objektu podľa normy IEC 60270. Na overenie a potvrdenie miesta vzniku výbojovej činnosti bola použitá akustická sonda [2].

Prvé meranie sa vykonalo na cievke umiestnenej mimo tela statora, zavesenej na izolačnej šnúre vo Faradayovej klietke. Takto bolo dosiahnuté elektrické oddelenie skúmaného objektu od iných uzemnených a neuzemnených

objektov. Vysoké napätie bolo privedené na vzájomne prepojený začiatok a koniec vodiča cievky. Vodivé časti drážkovej časti cievky boli vzájomne prepojené a uzemnené na spoločnú ekvipotenciálnu prípojnicu (pozri obr.2).



Obr. 1: Merací systém na meranie čiastkových výbojov



Obr. 2: Meranie čiastkových výbojov na cievke mimo drážky statora

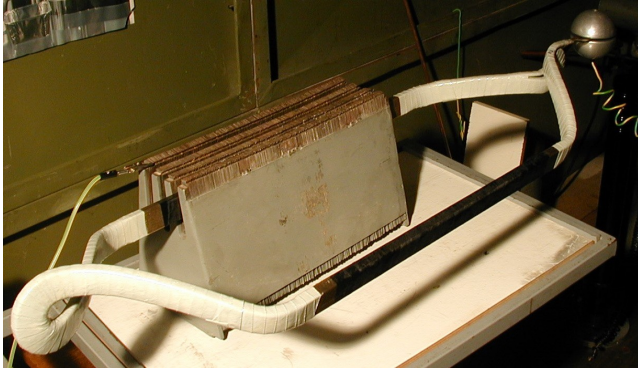
Napätie bolo postupne zvyšované, až do objavenia počiatočných výbojov. Vtedy bolo vykonané prvé meranie čiastkových výbojov. Ďalej napätie krokom 200V sa zvyšovalo do hodnoty 6,2 kV, ktoré o 200V prevyšuje hodnotu nominálneho združeného napätia cievky 6 kV. Pri každej napäťovej hladine bolo vykonané meranie čiastkových výbojov.

Modelovanie podmienok v prevádzke bolo realizované po umiestnení cievky vinutia do drážky statora. Na rozdiel

od predchádzajúceho prípadu, uzemnený bol výsek statora (pozri obr.3).Vysoké napätie bolo riadené obdobným spôsobom, ako bolo popísané vyššie.

**Výsledky experimentu a diskusia**

Výsledky meraní poukazujú na rozdielny rozvoj výbojovej činnosti, hoci v oboch prípadoch sa jednalo o rozvoj výbojov pri výstupe cievky z drážky statora. Zmena maximálnych hodnôt zdanlivého náboja častkových výbojov pri zvyšovaní napätia je možné vidieť pre cievku zavesenú na obr. 4a a pre cievku umiestnenú do drážky statora na obr. 4b.



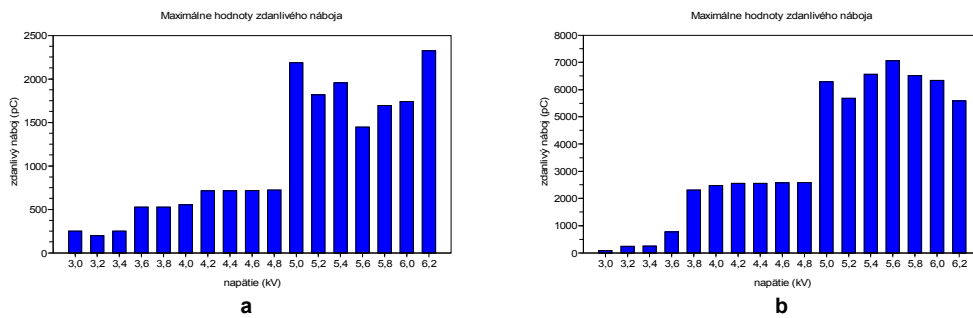
Obr. 3: Model cievky uložený v drážke výseku statora

Počiatkové výboje v oboch prípadoch sa objavili pri rovnakom napätí 3kV a ich maximálna hodnota zdanlivého náboja neprevýšila 100pC. K rozdielu došlo už pri  $U=3,8kV$  kedy maximálna hodnota výbojov u zavesenej cievky bola 500pC a u cievky v drážke – 2300pC. Akustická sonda poukázala na rozdielny smer šírenia výbojovej činnosti.

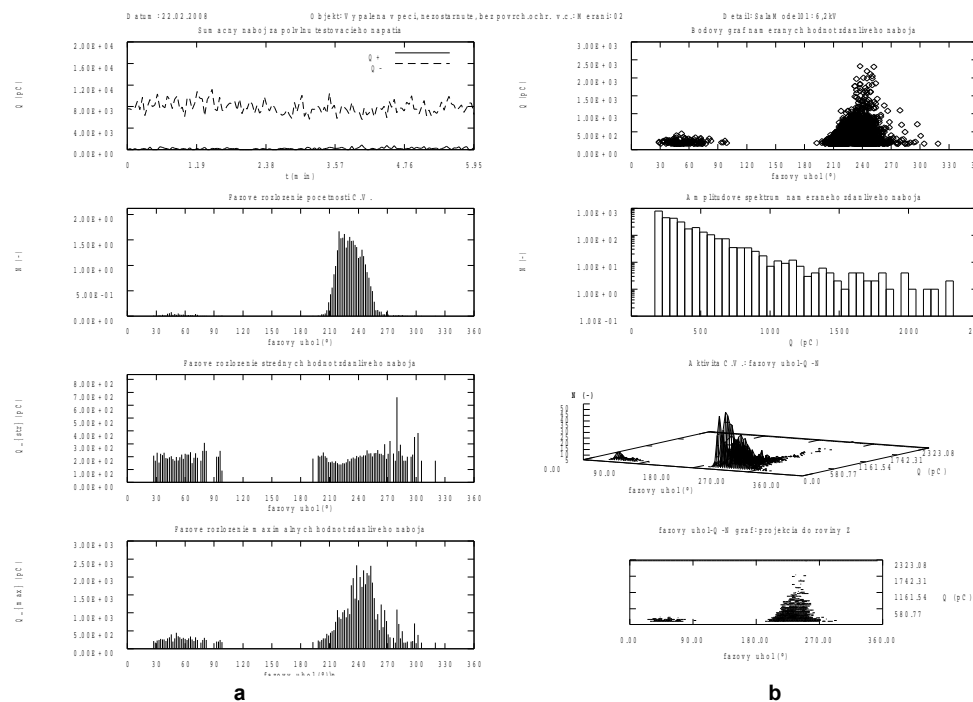
V prípade zavesenej cievky výboje sa rozširovali smerom k čelu cievky. Keď bola cievka umiestnená v drážke, vtedy sa výboje rozširovali smerom do stredu drážky. Pri napät'ovej hladine 5kV boli akusticky detekované v celej drážke, kedy maximálna amplitúda zdanlivého náboja dosahovala 6200pC. Pri ďalšom zvýšení napätia došlo k stabilizácii výbojovej činnosti.

Na porovnanie fázových rozložení zdanlivého náboja častkových výbojov uvedieme výsledky meraní na zavesenej cievke pri napät'ovej hladine 6,2kV (obr.5) a na cievke umiestnenej v drážke statora pri napätí 4kV (obr.6).

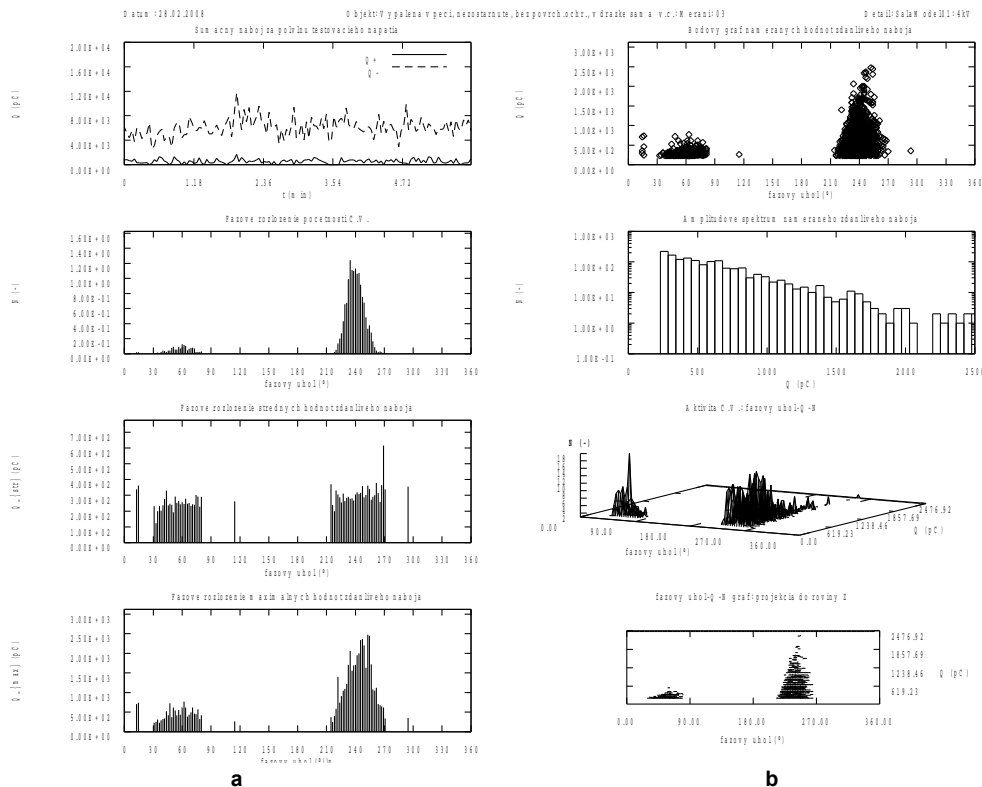
Maximálna hodnota zdanlivého náboja v kladnej polvine aplikovaného napätia neprevyšuje 500pC a v zápornej – 2400pC pre oboja prípady. Početnosť a sumačný náboj za polvnu testovacieho napätia sú taktiež porovnateľné. Rozdiel je v priloženom napätí: tá istá výbojová činnosť sa objavila oveľa skôr u cievky uloženej v drážke. Z podobnosti fázových rozložení je možné konštatovať, že sa jedná o rovnaký typ výbojovej činnosti. Sú to výboje



Obr 4: Zmena maximálnych hodnôt zdanlivého náboja častkových výbojov pri zvyšovaní napätia



Obr 5: Analýza častkových výbojov pri napät'ovej hladine 6,2kV



Obr 6: Analýza čiastkových výbojov pri napätovej hladine 4kV

rozvíjajúce sa po povrchu izolácie cievky v mieste ukončenia vodivej ochrany, t.j. v mieste výstupu cievky z drážky statora.

Fázové rozloženia, namerané pri maximálnej hodnote napätia 6,2kV sú podobné pre oba umiestnenia cievky, ale maximálne hodnoty zdanlivého náboja sú rozdielne: v prípade zavesenej cievky  $q_{max}=2300pC$  a u cievky vloženej do drážky  $q_{max}=5500pC$ . To hovorí o tom, že výbojová činnosť je intenzívnejšia a skôr sa rozvíja u cievky uloženej do drážky statora.

**Záver**

Dlhodobé pôsobenie výbojovej činnosti vedie k erózie a poškodeniu povrchu izolácie vysokonapäťových cievok. Je to veľmi dôležité rozoznať typ poruchy statorovej izolácie prevádzkovaného stroja. Predkladané výsledky meraní umožňujú určiť výboje rozvíjajúce sa pri výstupe cievky z drážky statora a navrhnúť spôsob ich odstránenia. Aby bolo možné rozoznať ďalšie typy porúch statorovej izolácie ( napr. výboje v drážke statora, vnútorné výboje, výboje na čelách vinutí a iné) je potrebné pokračovať v modelovaní výbojovej činnosti v elektrických strojoch točivých.

**Literatúra**

- [1] Zališ K.: Evaluation of Partial Discharge Activity by Expert Systems. In: 11th International Symposium of High Voltage Engineering, ref. 5.344.P5, London, Sept.1999.
- [2] Petráš J.: Akustická emisia čiastkových výbojov, ELEN 2006, ČVUT Praha, 18.-19.9.2006.
- [3] Džmura J.: Vyhodnocovanie parametrov signálov akustickej emisie čiastkových výbojov. In: Starnutie elektroizolačných systémov. č. 3 (2007), s. 21-24. Internet: <<http://www.tuke.sk/fei-kee/jses/uploads/images/jses/jses-03-2007.pdf>>. ISSN 1337-0103.

**Podakovanie**

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

**Authors**

Iraida Kolcunová, Roman Cimbala, Juraj Kurimský, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechnickej a informatiky, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 04210 Košice, Slovenská republika  
 E-mail: [iraida.kolcunova@tuke.sk](mailto:iraida.kolcunova@tuke.sk), [roman.cimbala@tuke.sk](mailto:roman.cimbala@tuke.sk), [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)

Bystrík Dolník

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Vplyv kombinovaného elektrického a tepelného namáhania na elektrické vlastnosti varistorov vyrobených na báze ZnO

**Abstrakt.** Varistory vyrobené na báze ZnO majú elektrické vlastnosti, ktoré sa využívajú v prístrojoch na ochranu pred prepätím. Počas prevádzky pôsobia na ZnO varistory vonkajšie činitele, ktoré majú vplyv na celkovú životnosť varistorov. V článku je opísaný experiment, ktorý sa realizoval v laboratórnych podmienkach na vn ZnO varistoroch použitím metódy urýchleného starnutia. Porovnávajú sa vybrané elektrické veličiny na začiatku a na konci experimentu, ktorý trval celkovo 4 000 hodín.

**Abstract.** Zinc oxide based varistor is an important semiconductor with exceptional electric characteristics. Due to its specific properties it can be used as surge protection devices. Leakage current flowing through varistor depends on external conditions as well as ageing process of varistor blocks. In this article the accelerated ageing procedure applied on ZnO based varistors is described. Some electric quantity with new and degraded varistors are compared. (*The Influence of Combined Electric and Thermal Stress on Electric Properties of ZnO Based Varistors*).

**Kľúčové slová:** varistor, ZnO, volt-ampérová charakteristika.

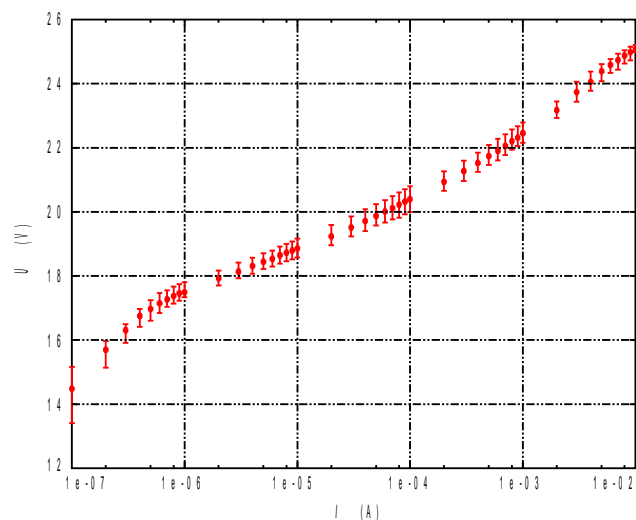
**Keywords:** varistor, ZnO, current-voltage characteristic.

### Úvod

Varistory vyrobené na báze ZnO klasifikujeme podľa šírky zakázaného pásma ako polovodič. ZnO varistory sa vyznačujú nelineárnou závislosťou prúdu od napätia; jedná sa o vodivosť typu n: nosičmi náboja sú pohybujúce sa elektróny vo vodivostnom pásme. Nelineárne vlastnosti ZnO varistora využíva sa v zariadeniach na ochranu pred prepätiami. Ak je na varistor priložené napätie, tak tečie ním zvodový prúd, ktorý má prevažne kapacitný charakter: jeho veľkosť závisí od pôsobenia vonkajších faktorov, napr. teplota okolia, veľkosť priloženého napätia, ako aj od zostarnutia varistorového bloku.

V súčasnosti vyrábajú sa varistory s menovitým napätím od niekoľkých jednotiek voltov až do niekoľko tisíc voltov pre prúdové zaťaženie od jednotiek ampérov až do desiatok kiloampérov. Meraním niektorých vybraných elektrických veličín na varistoroch možno posúdiť ich prevádzkový stav, ako aj schopnosť ďalšej prevádzky; porovnávajú sa vybrané elektrické veličiny namerané pred použitím varistora s aktuálnymi veličinami.

Na obr. 1 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia od prúdu tečúceho ZnO varistorom pri normálnej teplote okolia.



Obr. 1. Závislosť napätia od prúdu ZnO varistora pri teplote 23 °C

### Aplikácia metódy urýchleného starnutia

Niektoré zmeny elektrických vlastností ZnO varistorov možno zistiť priebežnými meraniami vybraných elektrických veličín na varistoroch.

Na zistenie elektrických vlastností ZnO varistorov počas starnutia, používajú sa v laboratórnych podmienkach metódy urýchleného starnutia. Používa sa kombinované namáhanie a to zvýšeným elektrickým poľom a zvýšeným teplotným poľom (používa sa aj namáhanie iba jedným degradačným činiteľom), prípadne ak je treba, použije sa ešte ďalší fyzikálny jav urýchľujúci proces starnutia, napr. injektáž vlhkosti (roztoku) s definovanou elektrickou vodivosťou, ktorá reprezentuje vodivosť tzv. kyslého dažďa v určitej lokalite (oblasti).

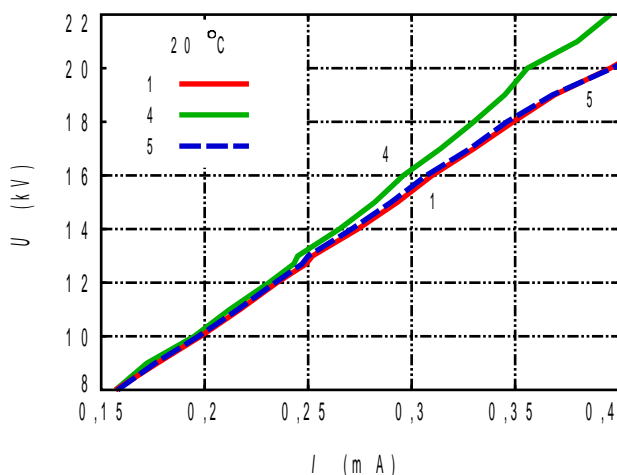
### Fáza experimentov

Na sledovanie zmien niektorých elektrických veličín ZnO varistorov použilo sa elektrotepelné namáhanie s trvaním maximálne 4 000 hodín. Elektrické veličiny merali sa podľa potreby v definovaných časových intervaloch: minimálny časový interval bol 100 hodín. Elektrické namáhanie bolo zvýšené o 18 % voči normálnemu prevádzkovému stavu: na svorkách varistora bolo priložené napätie 12,7 kV zodpovedajúce fázovému napätiu v 22 kV sieti vysokého napätia. Tepelné namáhanie bolo realizované kontinuálnym pôsobením zvýšenej teploty na varistory s hodnotou alebo 135 °C alebo 140 °C. Po konečnom vyrovnaní teploty vo vzorke, priložilo sa zvýšené napätie.

V experimente celkovo bolo použitých päť vzoriek, ktorými boli varistory na napätovú hladinu vysokého napätia 22 kV. V experimente boli použité štyri rôzne kombinácie urýchleného starnutia, pričom jedna vzorka nebola namáhaná vôbec, pretože slúžila ako referenčná vzorka a všetky vybrané elektrické veličiny merali sa spolu s ostatnými vzorkami.

Vybrané elektrické veličiny boli tieto:  
zvodový prúd pri fázovom napätí a jeho harmonická analýza pri rôznych teplotách okolia;  
zvodový prúd pri združenom napätí a jeho harmonická analýza;  
napätie pri prietoku prúdu 1 mA;  
závislosť napätia od prúdu pri rôznych teplotách okolia;  
činiteľ dielektrických strát;  
kapacita varistorov pri zníženom napätí.





Obr. 2. Závislosť napätia od prúdu pri teplote 20 °C

### Výsledky experimentu pri 20 °C

Na obr. 2 sú zobrazené závislosti napätia od prúdu na vzorkách č. 1, 4 a 5 merané pri teplote 20 °C a pri teplote 135 °C. Z priebehu na obr. 2 nameranom pri teplote 20 °C vidno posun v závislosti napätia od prúdu vzorky č. 4 k menším hodnotám zvodového prúdu, hoci táto vzorka bola namáhaná zvýšeným striedavým elektrickým poľom a zvýšeným tepelným poľom so súčasným pôsobením vlhkosti: injektáž vody s definovanou vodivosťou.

Na vzorke č. 5, ktorá bola namáhaná zvýšenou teplotou a zvýšeným striedavým elektrickým poľom nenastali podstatné zmeny v závislosti napätia od prúdu.

### Výsledky experimentu pri 135 °C

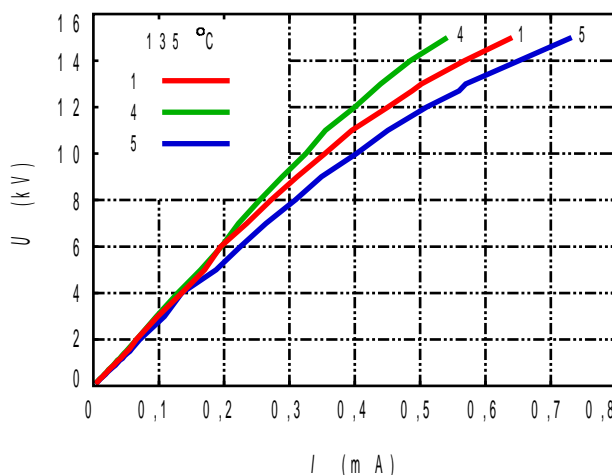
Na obr. 3 je opäť, pre vzájomné porovnanie, zobrazená závislosť napätia od prúdu na vzorkách č. 1, 4 a 5 nameraná pri zvýšenej teplote 135 °C. Zmena v závislosti napätia od prúdu voči referenčnej závislosti, ktorú reprezentuje vzorka č. 1, je zrejماً už od priloženého napätia 5 kV na vzorke č. 5. S rastúcim priloženým napätím je odchylenie od referenčnej závislosti k väčším hodnotám celkového zvodového prúdu výraznejšie.

Pre porovnanie: pri fázovom napätí 12,7 kV činí odchylenie 72  $\mu\text{A}$ , čo je nárast o 15,75 %; pri napätí 15 kV činí odchylenie 91  $\mu\text{A}$  a tomu zodpovedajúci nárast zvodového prúdu o 14,2 %. Naproti tomu, na vzorke č. 4 je viditeľné odchylenie od referenčnej závislosti napätia od prúdu k nižším hodnotám celkového zvodového prúdu a to od priloženého napätia 7 kV; s rastúcim priloženým napätím je odchylenie väčšie: pri priloženom fázovom napätí činí odchylenie –60  $\mu\text{A}$ , čo je pokles o 12,3 % a pri priloženom napätí 15 kV činí odchylenie –99  $\mu\text{A}$  a tomu zodpovedajúci pokles o 15,4 %.

### Záver a diskusia

Experiment na ZnO varistoroch, ktorý bol realizovaný v laboratórnych podmienkach trval celkovo 4 000 hodín. Počas tohto dlhodobého experimentu aplikovala sa na vzorkách metóda urýchleného starnutia za účelom získania poznatkov o výpovedeschopných elektrických veličinách, ktoré sú charakteristické pre stupeň zostarnutia ZnO materiálu.

Počas trvania experimentu merali sa priebežne na vzorkách v definovaných časových intervaloch vybrané elektrické veličiny. Po ukončení celého experimentu bola zistená zmena v závislosti priloženého napätia od celkového zvodového prúdu tečúceho vzorkou. Táto zmena s rastúcou teplotou vzorky je výraznejšia.



Obr. 3. Závislosť napätia od prúdu pri teplote 135 °C

Výskum, založený na experimentoch v laboratórnych podmienkach, zaoberajúci sa skúmaním zmien elektrických vlastností varistorov na báze ZnO vplyvom kombinovaného elektrického a tepelného namáhania bude ďalej pokračovať. Podrobnejšie budú sledované – so súčasným priebežným vyhodnocovaním – ďalšie vybrané elektrické veličiny za účelom zistenia výpovedeschopných veličín ukazujúcich na stupeň zostarnutia ZnO varistorov.

### Literatúra

- [1] Mora-Sero, I. D.: *Determination of carrier density of ZnO nanowires by electrochemical techniques*, Applied Physics Letters, č. 89, 2006. s. 203117-1–3. [on-line]. 2006. [cit. 15. 07. 2008]. Dostupne na internete: <<http://www.elpl.uji.es/paperspdf/2006/APLZnOnanowire.pdf>>
- [2] Kučera, J.: *Vlastnosti, použitie a prínos omezočúcich prepätí bleskoistek ZnO*. In: Elektro, č. 9, 1991, s. 214–219.
- [3] Dolník, B.: *Harmonická analýza zvodového prúdu obmedzočúcich prepätí*. Dizertačná práca. Školiteľ: prof. Ing. K. Marton, DrSc. Košice, 1996.

*Autor vyjadruje poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/3142/06.*

**Autor:** Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [Bystrik.Dolnik@tuke.sk](mailto:Bystrik.Dolnik@tuke.sk)

Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechnicky a informatiky

## Laboratórny výskum výbojovej činnosti v modeloch s kombinovanou izoláciou papier-olej

**Abstrakt.** Príspevok popisuje modelovanie výbojového efektu v laboratórnych podmienkach. Izolačný systém papier-olej, ktorý sa používa vo výkonových transformátoroch je citlivý na zmeny prostredia. Pre tieto účely bol skonštruovaný špeciálny elektródový systém. Jeho vlastnosti boli testované na modeli izolácie. Výsledky poukazujú na možné smerovanie výskumu snímania čiastkových výbojov v laboratórnych podmienkach.

**Abstract.** This paper is oriented on the modeling of partial discharges effect in laboratory condition. Compound Insulation paper-oil used in power transformers is very sensible to outdoor operation impact factors. For this purposes special electrode systems for measurement of partial discharges activity was constructed. Its properties with electric method was tested. Experiments with this method showed interesting experiences for future work.

**Kľúčové slová:** elektrický stroj, statorová izolácia, vn cievka, drážka statora, čiastkové výboje, starnutie, degradácia

**Keywords:** electric machine, stator insulation, h.v.coil, stator slot, partial discharges, ageing, degradation

### Úvod

Čiastkový výboj v izolácii olejom plnených transformátorov vygeneruje elektromagnetický impulz, ktorého energia sa transformuje na mechanickú energiu v podobe tlakovej vlny. Transformácia z jednej formy energie na druhú sa nedá popísať jednoduchou funkciou, ale závisí od mnohých parametrov, napríklad: typ a intenzita čiastkových výbojov, typ dielektrika, v ktorom vznikajú. V závislosti na týchto parametroch trvanie tlakovej vlny môže byť rôzne. Tieto vlny sa šíria olejovým médiom až kým jej čelo nenarazí na nádobu transformátora alebo tuhý predmet, ktorý je súčasťou konštrukcie transformátora. Existuje niekoľko spôsobov ako tento elektrofyzikálny proces využiť pre diagnostické merania. Tlakové pole vytvorené akustickou vlnou je vyjadrené diferenciálnou rovnicou druhého rádu:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2},$$

kde  $p$  je tlakové pole,  $\nabla$  je Laplaceov operátor,  $v$  je rýchlosť šírenia zvuku v médiu,  $t$  je čas [1]. Základnými parametrami, ktoré kvantifikujú akustickú tlakovú vlnu sú:

1. akustická rýchlosť  $v$  (m/s),
2. intenzita akustického vlnenia  $I$  (W/m<sup>2</sup>),
3. akustický tlak  $p$  (Pa),
4. hladina akustickej intenzity  $L_I$  (dB) a hladina akustického tlaku  $L_p$  (dB).

Je výhodné monitorovať neúplné prierazy dielektrika práve akustickými metódami. Základné charakteristiky vzniknutého vlnenia je možné modelovať v laboratórnych podmienkach, pričom pri dodržaní špecifických požiadaviek sa dá dosiahnuť patričná zhoda laboratórnych a in-situ meraní. S výhodou je možné aplikovať kombináciu tejto metódy s priamou metódou. Takýmto spôsobom sa počet výpovedeschopných parametrov zvýši a ich referencie o príčinách emisie sa spresnia.

### Objekt výskumu

Objektom výskumu bolo dielektrikum vytvorené kombináciou olej-papier. Olejová zložka bola vytvorená transformátorovým olejom ITO 100. Papierové komponenty boli vyrobené z transformátorového papiera, v troch vrstvách s kruhovým prierezom, pozri obr. 1. Hrúbka papiera činila 430  $\mu\text{m}$ . Takýmto spôsobom boli pripravené štyri typy vzoriek: vzorka bez dutiny, vzorka s dutinou 1 mm, vzorka s dutinou 3 mm a vzorka s dutinou 6 mm.

Alternatívne boli pripravené aj vrstvené papierové vzorky spojené epoxidovou živicom. V tomto prípade hrúbka vzoriek dosahovala 1 350  $\mu\text{m}$ , z čoho každá epoxidová vrstva mala hrúbku 30  $\mu\text{m}$ , pozri obr. 1.

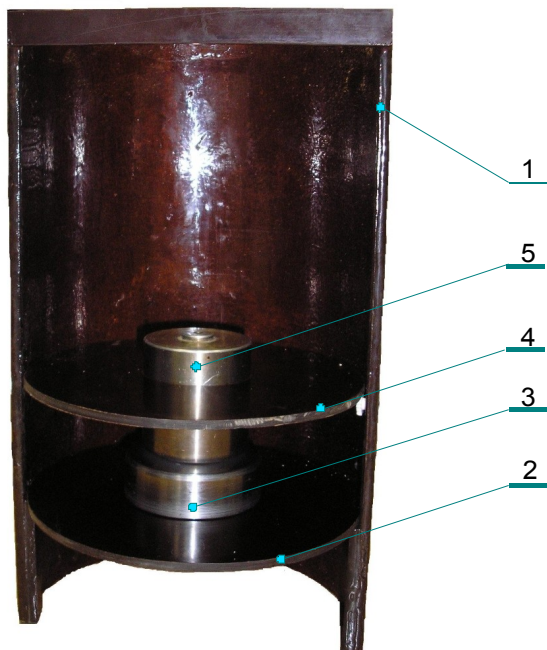


Obr. 1: Objekt modelu vn izolácie olej-papier

### Metodika experimentu

Za účelom experimentu bol zostrojený špeciálny elektródový systém podľa obr. 2. Pri konštrukcii elektródového systému bolo cieľom zabezpečiť konštantný planparalelný prítlak vzoriek z transformátorového papiera pri meraniach bez ich vzájomného zlepenia, vymeniteľnosť elektród pri zabezpečení ich reprodukovateľnej vzájomnej polohy počas meraní a pri výmene vzoriek.

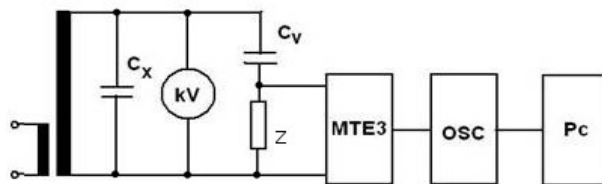
Ako základná nosná časť elektródového systému je použitá bariéra z bakelitizovaného papiera v tvare žlabu 1 používaná pri konštrukcii vysokonapäťových transformátorov. V jej spodnej časti je umiestnená izolačná plošina 2 z rovnakého materiálu, na ktorej je upevnená vymeniteľná oceľová elektróda 3. Polohovacia šablóna 4 slúži na zabezpečenie polohy vysokonapäťovej elektródy 5 o hmotnosti 1 kg. Elektródový systém so vzorkami sa pri meraniach ponoril do nádoby s izolačným olejom. Polohovacia šablóna bola odstránená a na vysokonapäťovú elektródu bolo privedené vysoké napätia pomocou rúrkového vodiča s priemerom 10 mm.



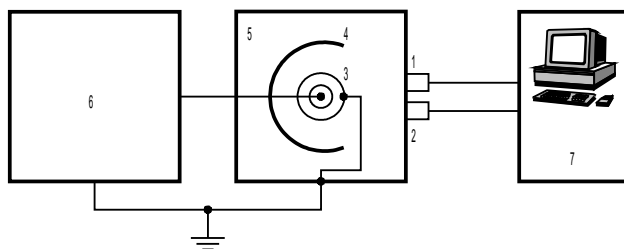
Obr. 2: Elektródový systém pre výskum akustickej emisie čiastkových výbojov

Cieľom experimentu bolo overenie možnosti modelovania výbojovej činnosti v kombinovanej izolácii transformátorový olej a papier za účelom skúmania tejto činnosti za rôznych prevádzkových podmienok s dostatočnou reprodukovateľnosťou nameraných výsledkov. Meracia aparatúra bola konštruovaná tak, aby umožňovala meranie elektrických aj neelektrických veličín od výbojovej činnosti aby sa umožnilo štúdium prejavov čiastkových výbojov na merané signály získané rôznymi

metódami. Princíp tejto metódy bol už viackrát publikovaný a je zahrnutý v norme IEC 60270 [5].

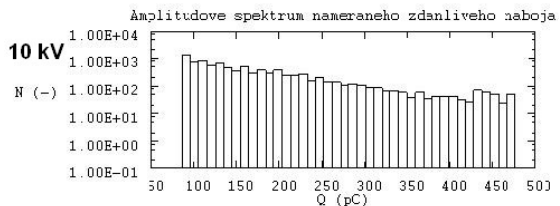
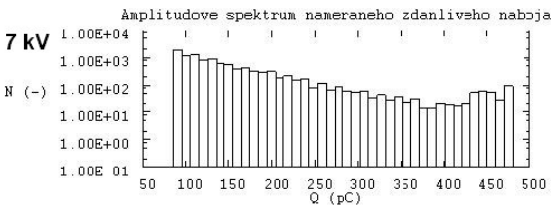
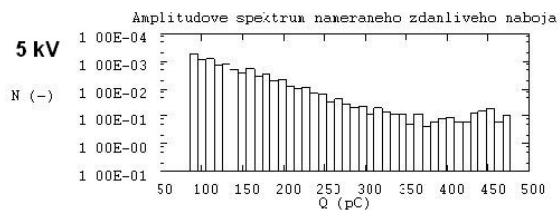
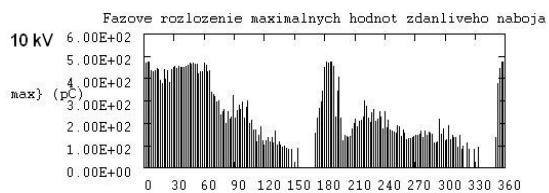
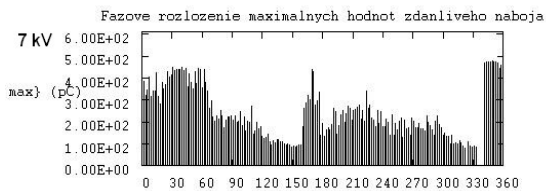
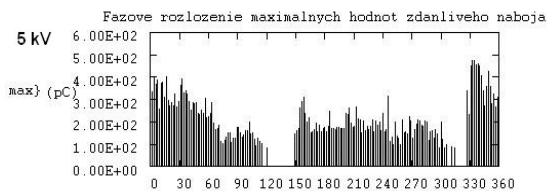


Obr. 3: Schéma zapojenia pre meranie priamou metódou



Obr. 4: Blokova schéma zapojenia pri meraní akustickou metódou

Skonštruovaný elektródový systém bol testovaný na vzorkách za účelom ďalšej optimalizácie jeho konštrukcie, pomocou priamej metódy realizovanej podľa zapojenia na obr. 2 [2]. Elektródový systém bol uzemnený prostredníctvom meracej impedancie, z ktorej bol snímaný a zaznamenávaný signál od výbojovej činnosti pomocou PC. Merania boli realizované na rôznych vzorkách



a

b

Obr 5: Výsledky získané spracovaním nameraného signálu

s dutinkami s priemerom 0,5, 1 a 1,5 mm, pri napätiach 5, 7, a 10 kV počas 6-minútového meracieho intervalu.

### Výsledky

Merané vzorky vykazovali časovú závislosť výbojovej činnosti, ktorá vyplýva zo zmeny fyzikálnych pomerov použitých materiálov. Po opakovanom vystavení vzoriek vysokému napätiu dochádza k stabilizácii parametrov a zmeny meraného signálu počas meracieho intervalu 6 minút sú v rozsahu 10–20 %.

Vzhľadom na počet druhov vzoriek a výšku skúšobného napätia bolo získané veľké množstvo nameraných výsledkov, z ktorých na demonštráciu uvádzame závislosti na obr. 4. Po skončení meraní boli vyhodnotené amplitúdové spektrá, sumačný náboj počas jednej polvlny priloženého napätia a fázové rozloženie maximálnych hodnôt čiastkových výbojov, ktoré sú na obr. 4. Amplitúdové spektrum ktoré je na obr. 4 preukázalo výskyt čiastkových výbojov v rozsahu 90–500 pC s maximom v oblasti 100 pC s postupným poklesom a málo výrazný maximom v oblasti okolo 450 pC. Priebehy sú pri všetkých napätiach tvarovo identické. Sumačný náboj vykazuje počas merania postupný nárast v závislosti od času ako aj zvyšovanie rozdielu náboja  $Q+$  a  $Q-$  so stúpajúcim napätím.

### Záver

Získané výsledky a skúsenosti poukazujú na potrebu ďalšieho vylepšovania postupu prípravy vzoriek a manipulácie s nimi počas realizovaných meraní. Ukázalo sa, že je potrebné sústrediť sa aj na priestorové usporiadanie celej meracej zostavy, aby sa predišlo vzniku nežiadúcich parazitných kapacít meniacich priestorové

napätové pomery v okolí elektródového systému meraných vzoriek a podporujú vznik nežiadúcich čiastkových výbojov. Pre presnejšie merania bude potrebné v budúcnosti homogenizovať všetky prepojovacie vedenia s cieľom dosiahnutia vyšších skúšobných napätí.

### Literatúra

- [1] Skubis, J. A state of development of the acoustic method for assesment of PD and directions of its improvement. 2nd I.C.D.I, High Tatras, Slovakia, 2000, s. 144–152.
- [2] Stoličný, P. Meranie výbojovej činnosti v izolácii papier-olej. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 63 s.
- [3] Petráš, J. Partial discharge acoustic emission signal analysis. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 177–179. ISSN 1731-6106.
- [3] Džmura, J. Macroscopic particles in direct and alternating electric field. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 78–80. ISSN 1731-6106.
- [3] Balogh, J. Partial discharge activity by inductive sensor and simultaneous acoustic emission sensing. Przeglad Elektrotechniczny. Vol. 3, 2007. pp. 13–15. ISSN 1731-6106.

### Podakovanie

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

### Autori

Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechnicky a informatiky, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 04210 Košice, Slovenská republika  
E-mail: jan.tkac@tuke.sk, juraj.kurimsky@tuke.sk, bystrik.dolnik@tuke.sk

Jaroslav Petráš, Jaroslav Džmura, Jozef Balogh

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Analýza signálov získaných z merania akustickej emisie častkových výbojov

**Abstrakt.** Tento príspevok sa zaoberá analýzou aktivity častkových výbojov pri meraní ich akustickej emisie pomocou piezoelektrických snímačov. Popisuje metódu analýzy častkových výbojov pomocou Waveletovej transformácie. Táto metóda umožňuje analyzovať časovú distribúciu spektrálnych komponentov prítomných v impulze akustickej emisie častkového výboja.

**Abstract.** This paper deals with partial discharge activity analysis in the case of measuring their acoustic emission by piezoelectric sensors. A method for partial discharge activity analysis with the help of Wavelet transform is described. This method enables to analyze the time distribution of spectral components present in partial discharge acoustic emission signal. (**Analysis of Signals Obtained from Partial Discharges Acoustic Emission Measurement**).

**Kľúčové slová:** častkový výboj, akustická emisia častkových výbojov, analýza akustických signálov, Waveletová transformácia.

**Keywords:** partial discharge, acoustic emission of partial discharges, analysis of acoustic signals, Wavelet transform.

### Úvod

Analýza signálu použitím Fourierovej transformácie je optimálna pre zistenie spektrálneho zloženia stacionárnych signálov. Signály akustickej emisie častkových výbojov však nie sú stacionárnymi signálmi a majú charakter impulzov. To znamená, že spektrálne zloženie signálu sa v čase mení. Amplitúdovo-frekvenčné spektrum získané Fourierovou transformáciou však zobrazuje všetky spektrálne zložky nezávisle od času ich výskytu v časovom priebehu signálu. Chýba teda pri tejto reprezentácii signálu časová informácia spektrálneho zloženia.

Aplikácia Fourierovej transformácie predpokladá stacionárny signál. V prípade impulzných signálov možno určiť časový interval, v ktorom bude signál považovaný za stacionárny. V tomto intervale možno aplikovať Fourierovu transformáciu a vypočítať spektrum. Na výber časti signálu sa používa oknová funkcia  $w$ . Tieto predpoklady tvoria základ Krátkodobej Fourierovej transformácie (Short Time Fourier Transform - STFT).

Krátkodobá Fourierova transformácia má jeden nedostatok: dĺžka oknovej váhovacej funkcie je rovnaká v celom frekvenčnom pásme, čiže frekvenčná oblasť je rozdelená lineárne. Ak zvolíme dlhé trvanie oknovej funkcie, dostaneme dobré frekvenčné rozlíšenie, ale naopak časová rozlišovacia schopnosť sa zníži. Ak zvolíme krátko trvajúcu oknovú váhovaciu funkciu, dostaneme dobré časové rozlíšenie, frekvenčná rozlišovacia schopnosť sa však zníži.

### Waveletová transformácia

Nedostatok STFT rieši analýza signálu transformáciou s viacnásobným rozlíšením (MRA - Multiresolution analysis). Takúto zmenu rozlíšenia dosiahneme Waveletovou transformáciou a to bez porušenia Heisenbergovho princípu neurčitosti.

Pri Waveletovej transformácii zmenou časového trvania oknovej váhovacej funkcie dosahujeme pri vyšších frekvenciách väčšie časové rozlíšenie  $\Delta t$ , a pri nízkych frekvenciách väčšie frekvenčné rozlíšenie  $\Delta f$ . To znamená, že pomocou Waveletovej transformácie je možné rozlíšiť v signáli akustickej emisie častkových výbojov veľmi krátko trvajúce deje impulzného charakteru a súčasne je možné detekovať udalosti s nízkou frekvenciou [1].

Spojité Waveletová transformácia, na rozdiel od Fourierovej transformácie rozkladá transformovaný signál

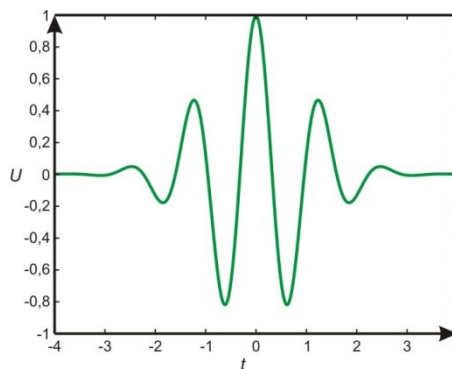
na modifikované verzie základnej funkcie, ktorá sa nazýva materská vlnka (wavelet = vlnka). Modifikáciou materskej vlnky sa rozumie pri spojitý Waveletovej transformácii (CWT – Continuous Wavelet Transform) kontinuálna zmena jej miery  $s$  a časového posunu  $p$ , čím dostaneme súbor vlniek [1]:

$$\Psi_{p,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \Psi\left(\frac{t-p}{s}\right)$$

kde  $s$  je reálne nenulové číslo určujúce mierku,  $p$  je reálne číslo určujúce časový posun vlnky,  $t$  je čas. Potom CWT je definovaný nasledovne [1]:

$$W(s, p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi_{s,p} \cdot dt = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-p}{s}\right) \cdot dt$$

Algoritmus výpočtu Waveletovej transformácie je podobný výpočtu STFT v tom zmysle, že analyzovaný signál je postupne násobený modifikovanou vlnkou, ktorá pri tejto transformácii zastupuje oknovú váhovaciu funkciu. Koeficienty Waveletovej transformácie sú počítané najprv pre konštantnú mierku pri postupnom posuve vlnky (oknovej funkcie) v čase. Po posunutí cez celé trvanie transformovaného signálu sa postup zopakuje s inou mierkou (parameter  $s$ ).



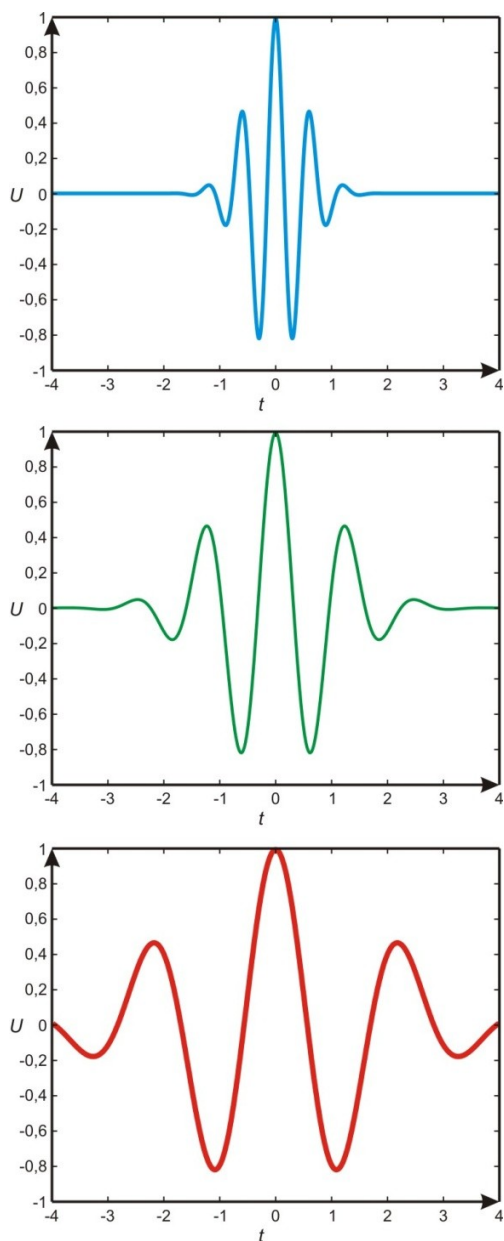
Obr. 1 Wavelet – vlnka Morletova

Wavelet – vlnka musí byť jednoduchá funkcia s konečnou energiou a nulovou priemernou hodnotou. Modifikácia vlnky nesmie tieto podmienky porušiť. Historickým vývojom bolo vytvorených mnoho materských vlniek s tvarovo odlišným priebehom v čase napr. Haarova

vlnka, Daubechies wavelet, Morlet wavelet, Mexican Hat wavelet a iné. Sú však svojim krátkodobým charakterom vhodné pre analýzu impulzných signálov. Na obrázku 1 je zobrazený priebeh Morletovej vlnky [1, 2].

Parameter  $s$  – škála (mierka, scale), ktorý vystupuje v predošlých vzťahoch určuje mieru prítomnosti detailov vo výslednom škálograme. Vysoká hodnota  $s$  korešponduje s nedetailným globálnym pohľadom na signál a je analógiou nižších frekvencií pri Fourierovej transformácii. Naopak, nízke hodnoty škály reprezentujú detaily v signáli a sú analógiou vysokých frekvencií pri Fourierovej transformácii.

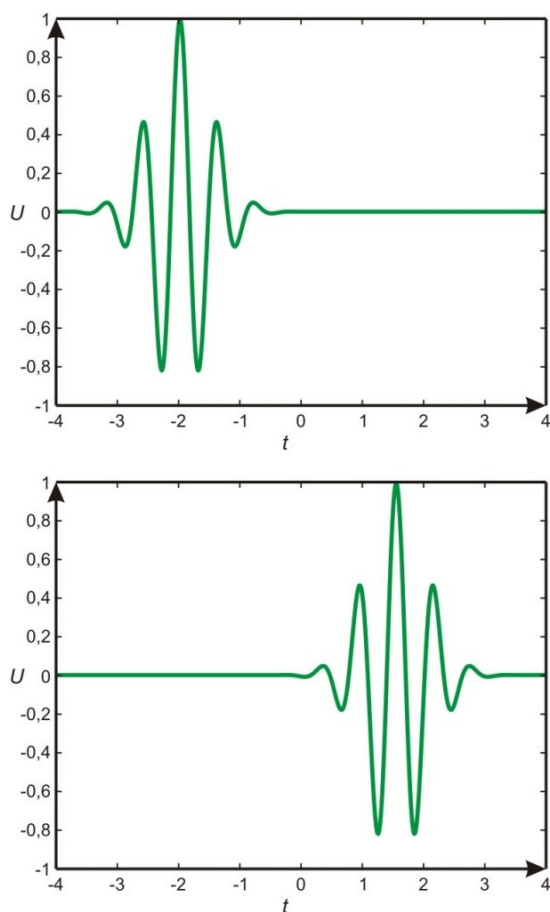
Z matematického pohľadu parameter  $s$  modifikuje materskú vlnku: spôsobuje dilatáciu alebo kompresiu vlnky v čase (obrázok 2). Väčšie hodnoty vlnku (oknovú váhovaciu funkciu) v čase rozširujú, nižšie stláčajú. Vzťah medzi mierkou a frekvenciou signálu nie je možné vyjadriť jednoduchým spôsobom a je potrebné ho počítať analyticky pre každú materskú vlnku zvlášť.



Obr. 2 Vplyv parametra  $s$  na tvar vlnky

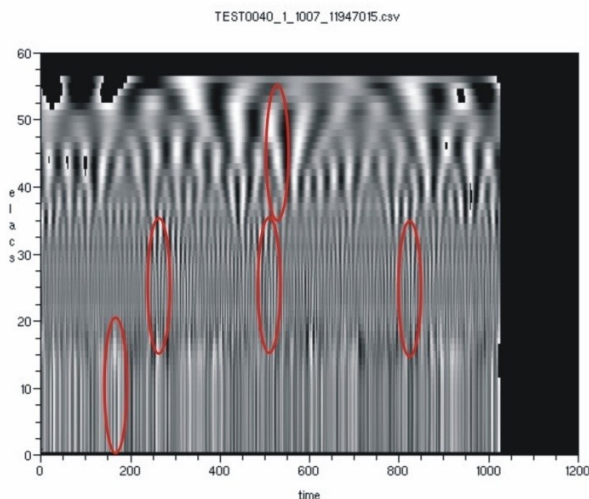
Parameter  $p$  – posun (delay) vystupujúci v predošlých vzťahoch určuje posun oknovej váhovacej vlnky pozdĺž celého trvania časového priebehu analyzovaného signálu

(obrázok 3). Je analógiou posunu váhovacej funkcie pri STFT.

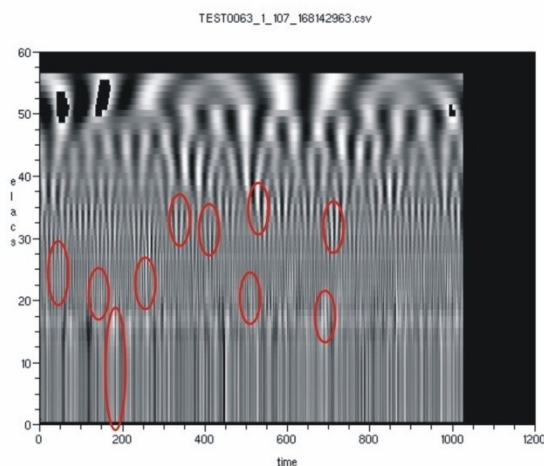


Obr. 3 Vplyv parametra  $p$  na tvar vlnky

Výsledkom Waveletovej transformácie definovanej podľa predošlého vzťahu je matica koeficientov Waveletovej transformácie  $W(s,p)$ . Ak počítame transformáciu pre mierku  $s = 1, 2, \dots, S$  a pre počet posunov  $N$ , dostaneme maticu s  $N$  stĺpcami a  $S$  riadkami. Koeficienty môžu nadobúdať záporné aj kladné hodnoty a ich veľkosť je priamo úmerná zhode (podobnosti) vlnky s mierkou  $s$  so segmentom analyzovaného signálu nachádzajúcim sa v mieste časového posunu  $p$ . Túto maticu je možné graficky znázorniť dvojrozmerné, pričom veľkosť koeficientov zodpovedá napr. jasnosti alebo farbe bodu v grafe. Pri trojrozmernom zobrazení  $z$ -os zodpovedá veľkosti koeficientov,  $x$ -os zodpovedá času a  $y$ -os zodpovedá mierke.



Obr. 4 Škálogram – dominantné frekvenčné pásma



Obr. 5 Škálogram – dominantné frekvencie

### Škálogramy signálov akustickej emisie čiastkových výbojov získané z Waveletovej transformácie

Obrázok 4 ukazuje škálogram impulzu akustickej emisie čiastkových výbojov na vzorke s vnútornými čiastkovými výbojmi medzi vrstvami transformátorového papiera. V grafe sú vyznačené zhluky spektrálnych komponentov – frekvenčných pásiem, ktoré sú reprezentované vyšším jasom bodov v grafe a ktoré majú krátke časové trvanie.

Na obrázku 5 je zobrazený škálogram impulzu akustickej emisie čiastkových výbojov na vzorke s čiastkovými výbojmi v plynom vyplnenej dutinke v dielektriku. V grafe sú opäť vyznačené zhluky spektrálnych

komponentov, v tomto prípade ale ide o zhluky bodov v grafe, ktoré sú reprezentované vyšším jasom bodov, majú krátke časové trvanie a sú frekvenčne užšie ohraničené.

### Záver

Waveletová transformácia je z hľadiska impulzného charakteru signálov akustickej emisie čiastkových výbojov vhodnejšou voľbou pre spektrálnu analýzu.

V škálogramoch je možné odlišiť impulzy čiastkových výbojov od odrazených impulzov toho istého výboja od stien vnútri zariadenia alebo od prekážok v akustickom kanáli snímania čiastkových výbojov piezoelektrickými sondami, ktoré sa v izolačnom systéme môžu vyskytovať. Táto úloha však zahŕňa rozpoznávanie obrazcov v 2-rozmernom viacúrovňovom obraze (pattern recognition).

Waveletová transformácia poskytuje na rozdiel od Fourierovej transformácie prehľad nielen o spektrálnom zložení signálu akustickej emisie čiastkových výbojov ale aj o ich výskyte v čase, čo je v prípade nehomogénnych izolačných systémov a v prípade odrazov akustických vln na rozhraniach dielektrík veľmi dôležité.

### Literatúra

- [1] Zimmermann, J.: Spektrografická a škálografická analýza akustického rečového signálu, Náuka, Prešov 2002, ISBN 80-89038-22-0
- [2] <http://cnx.org/content/m10436/latest/#defofd> - Discrete Wavelet Transform: Main Concepts
- [3] Petráš, J.: Využitie akustickej emisie čiastkových výbojov. In: DISEE 2006: Dielektrické a izolačné systémy v elektrotechnike a energetike: 16. medzinárodná konferencia, September 12-14, 2006, Častá - Píla. Bratislava : STU, 2006. s. 96-99. ISBN 80-227-2470-X.
- [4] Petráš, J.: Akustická emisia čiastkových výbojov, ELEN 2006, ČVUT, Praha, 18. - 19. 9. 2006, ISBN 80-239-3565-8
- [5] Kolcunová, I., Cimbala, R., Kurimský, J.: Porovnanie technologických postupov pri výrobe cievok elektromotorov. Výrobné inžinierstvo. 2008, ISSN 1335-7972.

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

### Autori:

Ing. Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: [jaroslav.petras@tuke.sk](mailto:jaroslav.petras@tuke.sk)

Ing. Jaroslav Džmura, PhD., Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: [jaroslav.dzmura@tuke.sk](mailto:jaroslav.dzmura@tuke.sk)

Ing. Jozef Balogh, PhD., Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: [jozef.balogh@tuke.sk](mailto:jozef.balogh@tuke.sk)

Dušan Medved', Jaroslav Petráš

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Vyšetrovanie rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní vzoriek

**Abstrakt.** Príspevok sa zaoberá vyšetrovaním rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní skúmaných vzoriek. Tepelné namáhanie je jedným z hlavných faktorov ovplyvňujúcich starnutie izolačného systému. Využitie vhodných numerických metód pomáha lokalizovať miesta s najvyšším teplotným gradientom a zvoliť tak príslušné opatrenia pred vznikom nežiaducich deštruktívnych javov. Osvedčenou metódou, ktorá je vhodná pre pomerne rýchle stanovenie rozloženia teplotného poľa je metóda konečných prvkov.

**Abstract.** This article deals with the investigation of temperature field distribution by heat stress of examined samples. Heat stress is one of the main factors that affect the isolation system ageing. The utilizing of appropriate numerical methods can help to localize places with the highest temperature gradient and then choose the correspondent actions before beginning of unwanted destructive effects. The reliable method, which is appropriate for the relatively fast determination of temperature field distribution, is the finite element method.

**Kľúčové slová:** teplotné pole, teplotné starnutie, metóda konečných prvkov

**Keywords:** thermal field, thermal ageing, finite element method

### Úvod

Z pohľadu spoľahlivosti energetických systémov je dôležitá diagnostika jednotlivých energetických zariadení. Vplyvom prevádzkových podmienok dochádza k starnutiu ich jednotlivých častí a tým aj k zmenám dôležitých elektrických a mechanických vlastností. Životnosť samotného zariadenia je daná prevažne životnosťou jeho izolačného systému. Preto je dôležité určiť životnosť a samotnú funkčnosť izolačného systému laboratórnymi skúškami. Laboratórne skúšky patria väčšinou do skupiny urýchlených skúšok a preto je potrebné voliť zosilňujúce skúšobné podmienky, aby čo najvernejšie simulovali reálne podmienky. Jenou z metód určenia funkčnosti izolačného materiálu pri tepelnom namáhaní je počítačová simulácia, pri ktorej sa zisťuje rozloženie teplotného poľa alebo štrukturálna zmena materiálu. Vhodnou metódou pri tejto počítačovej simulácii je metóda konečných prvkov a jej rôzne modifikácie.

### 1 Matematický model teplotného poľa

Matematické modelovanie patrí k hlavným činiteľom ovplyvňujúcich správny návrh ohrievacieho systému pre tepelné namáhanie vzoriek. Výber vhodného teoretického modelu závisí od niekoľkých faktorov, ktoré zahŕňajú zložitost' inžinierskej úlohy, presnosť výpočtu, čas výpočtu a v neposlednom rade cenu.

Pred uskutočnením výpočtu je dôležité rešpektovať skutočnosť, že akákoľvek výpočtová metóda môže nanajvýš vyprodukovať len také výsledky, ktoré sú odvodené z určitých fyzikálnych rovníc. Preto, prvým a jedným z najdôležitejších krokov v matematickom modelovaní je výber správneho teoretického modelu, ktorý správne popisuje technologický proces alebo jav.

Časovo premenné procesy tepelného namáhania v izolačnom materiáli je možné popísať rovnicou vedenia tepla [3]:

$$(1) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \cdot \nabla \vartheta) = q_e$$

kde  $\vartheta$  je teplota,  $\rho$  je objemová hmotnosť materiálu,  $c$  je merná tepelná kapacita,  $\lambda$  je tepelná vodivosť materiálu a  $q_e$  je merný tepelný výkon vnútorného zdroja energie

v jednotke objemu. Tento merný tepelný výkon zdroja energie  $q_e$  sa získa z výpočtu dopadajúceho sálavého toku z výhrevných článkov ohrievacieho telesa na povrch skúmaného materiálu.

Rovnica (1), spolu s vhodnými hraničnými a počiatočnými podmienkami, predstavuje rozloženie teploty v trojrozmernom priestore v ľubovoľnom čase a v ľubovoľnom mieste poľa. Počiatočná teplotná podmienka sa vzťahuje na rozloženie teploty v čase  $t = 0$  s, preto táto podmienka sa stanovuje len pri časovo premenných teplotných poliach, kde teplota je funkciou priestorových súradníc a aj času.

V mnohých úlohách tepelného namáhania, hraničné podmienky sa kombinujú s tepelnými stratami spôsobenými prúdením a sálaním. Ako príklad takejto hraničnej podmienky je možné uviesť výraz [3]

$$(2) \quad -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \mathbf{n}} = \alpha \cdot (\vartheta_p - \vartheta_0) + c_p \cdot (\vartheta_p^4 - \vartheta_0^4) + q_p$$

kde  $\frac{\partial \vartheta}{\partial \mathbf{n}}$  je teplotný gradient v smere normály k povrchu v uvažovanom bode,  $\alpha$  je koeficient prestupu tepla prostredím,  $c_p$  je koeficient sálania šedého povrchu (súčin Stefan-Boltzmannovej konštanty a príslušnej emisivity)  $q_p$  je generovaný výkon na povrchu skúmaného materiálu a  $\mathbf{n}$  vyjadruje normálový vektor k hranici povrchu.

Ak je ohrievané teleso symetrické pozdĺž osi symetrie, Neumannova hraničná podmienka má tvar

$$(3) \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

Neumannova hraničná podmienka vyjadruje skutočnosť, pri ktorej teplotný gradient v smere normály k osi symetrie je rovný nule. Alebo inými slovami, v osi symetrie neprebíha žiadna výmena tepla. Táto hraničná podmienka sa rovnako používa, ak je povrch valcového telesa dokonale izolovaný.

V prípade rozloženia teploty v telese valcového tvaru, rovnicu (1) je možné prepísať do tvaru [2], [3], [4]



$$(4) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \cdot r \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + q_e$$

Podobne, rovnica (1) sa môže v pravouhlej sústave súradníc (napr. pre rovinnú dosku, hranol) prepísať do tvaru

$$(5) \quad c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q_e$$

Rovnice (4) a (5) spolu s hraničnými podmienkami (2) a (3) sa najviac používajú pri matematickom modelovaní tepelných procesov.

**2 Riešenie 2-rozmerovej úlohy metódou konečných prvkov**

Riešiť teplotné pole znamená riešiť rovnicu šírenia tepla (1) s aplikáciou na 2-rozmerové teplotné pole v tvare [3], [5]

$$(6) \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a_{\vartheta} \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) + \frac{q_e}{c \cdot \rho}$$

kde  $t$  predstavuje čas,  $a_{\vartheta}$  koeficient tepelnej difuzivity. Zvyčajne sa zadáva tento koeficient ako konštantný, teda aj veličiny  $\lambda$  koeficient tepelnej vodivosti,  $\rho$  merná hmotnosť,  $c$  merná tepelná kapacita, sú konštantné. Vnútrotný zdroj  $q_e$  sa zadáva väčšinou premenný od času, prípadne podobne ako ostatné veličiny konštantný. Výpočet s takto definovanými veličinami je potom približným riešením skutočného rozloženia teplotného poľa. Aby sa zabezpečila vyššia zhoda s reálnym rozložením teplotného poľa je potrebné pred samotným výpočtom zadať tieto materiálové veličiny ako aj hodnotu vnútorného zdroja ako závislosti od teploty, prípadne ako závislosti od iných fyzikálnych veličín. Hodnoty jednotlivých teplôt v uzloch sa nezískajú priamo ale až po zložení všetkých elementov.

Diferenciálnu rovnicu (6) je možné riešiť pomocou metódy váhových rezíduí integrovaním tejto rovnice a s rešpektovaním hraničných podmienok ako [1], [4]

$$(7) \quad I = \int_{\Omega} w \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \cdot d\Omega - \frac{1}{a_{\vartheta}} \cdot \int_{\Omega} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) \cdot d\Omega + \frac{1}{a_{\vartheta}} \cdot \int_{\Gamma} w \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot d\Gamma - \int_{\Omega} w \cdot f(x,y) \cdot d\Omega$$

Kde prvý člen výrazu (7) znamená časovú zmenu teploty (v maticovom zápise to bude vektor), druhý člen značí priestorové rozloženie teploty (matica), tretí člen predstavuje hraničnú podmienku tepelného toku (vektor) a posledný výraz značí vnútorný zdroj v rámci riešenej oblasti  $\Omega$  (vektor).

Pri rozložení riešenej oblasti na konečný počet prvkov (elementov) sa získa sieť prvkov, v ktorých sa vyšetruje rozloženie teplotného poľa. Podľa toho, aký tvar elementu sa použije, odvíja sa zostavenie príslušných algebrických rovníc. Najčastejšie sa využíva v 2-rozmerových úlohách trojuholníková alebo obdĺžniková sieť.

Použitím trojuholníkovej siete prvkov sa oblasť rozdelí na konečný počet prvkov, ktoré musia spĺňať určité vlastnosti:

- a) každý element má tri vrcholy,
- b) jednotlivé elementy sa vzájomne neprekrývajú,
- c) číslovanie vrcholov elementov je proti smeru hodinových ručičiek.

Teplota v každom vrchole trojuholníka sa dá vyjadriť ako

$$(8) \quad \vartheta = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y$$

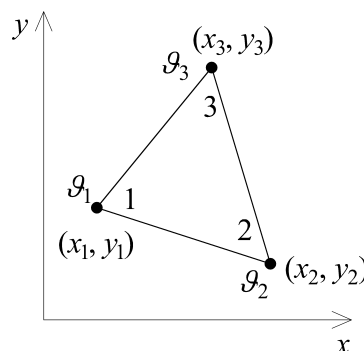
alebo v maticovom tvare

$$(9) \quad \vartheta = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

kde konštanty  $a_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sa určia z priestorových súradníc jednotlivých vrcholov trojuholníka. Teda, dosadením do príslušných rovníc teplôt v jednotlivých vrcholech trojuholníka sa získa maticový zápis

$$(10) \quad \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

Kde  $x_i$  a  $y_i$  sú súradnice  $i$ -teho uzla (vrcholu) a  $\vartheta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ , pre trojuholníkové elementy) sú uzlové premenné (viď obr. 1).



Obr. 1. Číslovanie jednotlivých trojuholníkových elementov

Inverziou matice (10) sa získajú jednotlivé konštanty  $a_i$

$$(11) \quad \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \cdot S} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2 & x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 & x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \end{bmatrix}$$

kde

$$(12) \quad S = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

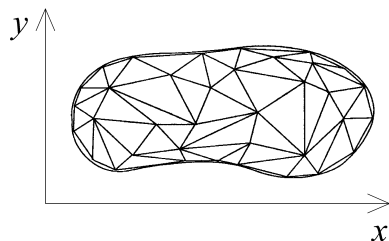
Veľkosť plochy  $S$  je totožná s veľkosťou elementárnej plošky trojuholníkového elementu. Aby bola táto plocha kladná, je nutné zabezpečiť číslovanie jednotlivých vrcholov elementov proti smeru hodinových ručičiek (viď obr. 1) a to všetkých elementov v rámci riešenej oblasti  $\Omega$ .

Dosadením rovnice (11) do rovnice (9) sa získa výraz pre rozloženie teploty v elemente

$$(13) \quad \vartheta = H_1(x,y) \cdot \vartheta_1 + H_2(x,y) \cdot \vartheta_2 + H_3(x,y) \cdot \vartheta_3$$

v ktorom  $H_i(x,y)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sú tzv. tvarové funkcie a vypočítajú sa z priestorového usporiadania jednotlivých vrcholov elementov.

Oblasť riešenia sa rozdelí na konečný počet elementov (trojuholníkov), napr. ako na obr. 2.



Obr. 2. Diskretizácia oblasti na konečný počet trojuholníkových elementov

Ako je vidieť z obr. 2 pri delení oblasti na elementy sa hranica skutočnej oblasti nahradzuje rovinnými hranicami a môže tak dôjsť k nepresnosti. Preto je potrebné pri ostrých hranách riešenej oblasti zvoliť väčší počet elementov (jemnejšie delenie).

Pre trojuholníkový element (obr. 1) je možné napísať maticu (druhý člen výrazu (7))

$$(14) [K^e] = \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) \cdot d\Omega = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}$$

kde  $\Omega^e$  je práve vyšetovaná oblasť elementu  $e$ . Jednotlivé prvky sa znova vypočítajú zo súradníc vrcholov jednotlivých elementov.

Tretí člen výrazu (7) je integrál predpísaného tepelného vtoku alebo výtoku do oblasti cez určitú hraničnú oblasť. Tento člen je možné prepísať do tvaru

$$(15) \int_{\Gamma_n} w \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot d\Gamma = \sum_{\Gamma^e} \int_{\Gamma^e} w \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot d\Gamma$$

teda ako sumu všetkých tepelných vtokov a výtokov v elementoch, ktoré sú súčasťou hranice vyšetovaného objektu.

Výraz (15) pri zostavovaní jednotlivých algebrických rovníc predstavuje stĺpcový vektor, ktorý sa pridáva k rovnici elementu, ktorý je práve riešený.

Riešenie časovo-priestorovej rovnice (7) je možné napokon vykonať napr. metódou konečných prvkov (pre každý element zvlášť a následným zložením) alebo v kombinácii s metódou konečných diferencií. Schéma výpočtu kombinácie metódy konečných prvkov a metódy konečných diferencií sa dá vyjadriť nasledovne [6]. Vyjadří sa časová zmena teploty (predstavuje zmenu v uzloch) ako

$$(16) \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = [\dot{\vartheta}]^t = \frac{[\vartheta]^{t+\Delta t} - [\vartheta]^t}{\Delta t}$$

Vypočítajú sa jednotlivé matice tvarových funkcií (reprezentujú priestorovú zmenu v rámci elementu), v prípade trojuholníkovej siete ako

$$(17) [M^e] = \frac{S}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

kde  $S$  predstavuje veľkosť elementárnej plošky elementu. Výsledný maticový tvar rovnice (7) vypadá potom nasledovne

$$(18) [M] \cdot [\dot{\vartheta}]^t + [K] \cdot [\vartheta]^t = [F]^t$$

Táto rovnica predstavuje maticový zápis rovnice (7), kde horný index vyjadruje čas, v ktorom sa vyšetruje rozloženie teploty. Matice  $[M]$  a  $[K]$  sú závislé len od súradníc, nie od času.

Dosadením výrazu (16) a postupne (17) a (14) do rovnice (18) je možné vyjadriť hľadanú teplotnú premennú

$$(19) [M] \cdot [\vartheta]^{t+\Delta t} = \Delta t \cdot ([F]^t - [K] \cdot [\vartheta]^t) + [M] \cdot [\vartheta]^t$$

Vo výraze (19) sú všetky členy závislé od času  $t$  na pravej strane a člen závislý od času  $t + \Delta t$  je na ľavej strane rovnice. Rovnica (19) sa rieši s počiatkovou podmienkou v čase  $t = 0$ , t.j.  $[\vartheta]^0$  a známymi hraničnými podmienkami  $[F]^t$  podľa schémy [6]:

1. V čase  $t = 0$  sa nájde riešenie rovnice  $[\vartheta]^{\Delta t}$  (19) s počiatkovými podmienkami  $[\vartheta]^0$  a  $[F]^0$ .

2. Po nájdení riešenia  $[\vartheta]^{\Delta t}$  sa pokračuje ďalej tak, že sa zmení časový krok o  $\Delta t$ , teda  $t = \Delta t$ , a vyrieši sa rozloženie teploty  $[\vartheta]^{2\Delta t}$ . Takto sa ďalej postupuje, až sa dosiahne konečný čas  $t = t_f$ .

### 3 Záver

Úlohou tohto príspevku bolo bližšie popísať postup riešenia rozloženia teplotného poľa pri tepelnom namáhaní (urýchlenom tepelnom starnutí) metódou konečných prvkov. Metóda konečných prvkov, ako univerzálna numerická metóda, je vhodná pre riešenie rozloženia teplotného a s výhodou sa využíva pre jej relatívnu jednoduchosť a rýchlu konvergenciu.

### Literatúra

- [1] Kwon Y. W.: The finite element method using MATLAB. CRC-Press: 1997. 527 s. ISBN 0849396530.
- [2] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z.: The Finite Element Method: Its Basic and Fundamentals. BUTTERWORTH HEINEMANN: 2005. ISBN 0-7506-6320-0.
- [3] Sadiku, M. N.: Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC Press: 2000. 760 s. ISBN: 978084931
- [4] Won Young Yang: Applied Numerical Methods Using MATLAB. Wiley-Interscience: 2005. 528 s. ISBN 0471698334.3950.
- [5] Cimbala, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov. 1. vyd. Košice: TU, 2007. 188 s. ISBN 978-80-8073-904-1.
- [6] Medved', D.: Ohrev feromagnetických materiálov do Curieho teploty indukčnou metódou. Dizertačná práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 170 s.

Tento príspevok bol podporený projektmi Ministerstva školstva Slovenskej republiky APVV-20-006005 a VEGA 1/3142/06.

### Autori:

Dušan Medved', Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [Dusan.Medved@tuke.sk](mailto:Dusan.Medved@tuke.sk)  
Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [Jaroslav.Petras@tuke.sk](mailto:Jaroslav.Petras@tuke.sk)

Pavel Kaláb

teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT v Brně

## Efektivnost diagnostiky izolace elektrických strojů

**Abstrakt.** Z hlediska úspěšné diagnostiky má smysl zabývat se poruchami částečnými, které zcela nezabraňují používání stroje a poruchami postupnými, které se v čase rozvíjejí a mohou proto být diagnostickými měřeními včas odhaleny. Proto se také diagnostika dělá opakovaně v zdůvodněných časových intervalech. Úplným poruchám, tj. průrazu izolace, má být včasným rozpoznáním postupující poruchy zabráněno.

**Abstract :** The article deals with the effective diagnosis of the electromotor insulation. It describes one of the ways how to choose an optimum collection of diagnostic methodes.

**Klíčové slová:** diagnostika, izolace, elektrický stroj

**Keywords:** diagnostics, insulation, electrical device

### Proč diagnostika

Je obecnou zkušeností, že nejčastější příčinou poruch elektrického zařízení bývá selhání izolace. To může nastat z rozličných důvodů, nejčastěji však proto, že: 1. Izolace je vlivem provozních namáhání degradována až na hranici své elektrické pevnosti, 2. Elektrický průraz nastane v přímém důsledku mechanického poškození, 3. Elektrický průraz nastane v důsledku zvýšené intenzity v místech lokálních nehomogenit elektrického pole (ty vznikají vniknutím nečistot o značné konduktivitě do mikrotrhlin v izolaci či do míst jejího rozvrstvení), 4. Elektrický průraz nastane v důsledku výbojové činnosti v dutinkách vzniklých v izolaci jednak při výrobě a jednak vlivem provozního namáhání. Mohou být i jiné důvody. Obecně se jedná o zhoršení elektroizolačních vlastností, které se projeví jako elektrický průraz v místě, kde jsou k tomu nejpříznivější podmínky.

Diagnostika má poskytnout informaci o stavu izolace v okamžiku měření příslušné vybrané diagnostické veličiny a formulovat výrok o riziku možné poruchy při dalším provozování daného zařízení, tedy vyslovit prognózu. Zřejmě je diagnostika zvláště potřebná a užitečná při provozování takových strojů, jejichž selhání je doprovázeno buď obrovskými následnými ztrátami produkce anebo finančními ztrátami z titulu nesplnění smluvních závazků (nedodání energie, služeb, přepravy zboží atp.).

### Diagnostické metody

Je známo mnoho metod diagnostiky elektrické izolace a neustále se projevuje snaha hledat další. Vnucuje se otázka, proč tomu tak je. Odpověď je jednoduchá. Je to proto, že dosud žádná metoda není schopna kvantitativně vyjádřit buď míru zestárnutí anebo pravděpodobnost bezporuchového provozu. Připomeňme, že kvantitativní vyjádření je vždy jen odhadem a má proto smysl jen spolu s exaktním vyjádřením nejistoty odhadu. Toto právě chybí.

Nabízí se další otázka. Proč se nedaří vypracovat „stoprocentní metodu“? Vždyť nové metody se rozpracovávají na teoretickém základě, vycházejí z fyziky dielektrik. Patrně jsou tři základní příčiny: 1. Moderní elektroizolační materiály jsou látky z hlediska chemie i fyziky značně složité, zatímco teorie dielektrik předpokládá jednoduchou strukturu, 2. Na hodnotě měřitelných diagnostických veličin se podílí řada jevů v dielektriku, o nichž se předpokládá, že jsou navzájem nezávislé. Takové zjednodušení nemusí být oprávněné, 3. Předpokládá se souvislost diagnostických veličin s průrazným napětím,

neboť taková je zkušenost. Není to však prokázáno teoreticky. Neznalost je nahrazována experimentálním zjišťováním korelace obvykle na zjednodušeném modelu neboť reálný objekt je k experimentům příliš drahý anebo dokonce jedinečný.

Přijmeme-li shora naznačené příčiny našeho omezeného poznání, musíme se smířit s tím, že diagnostika elektrické izolace bude obvykle vyžadovat aplikaci více metod. Otázkou zůstává kolika, kterých a proč.

Z praktického hlediska lze rozdělit metody do dvou skupin. V první jsou metody postihující vlivy stárnutí i provozu sumárně v celém objemu diagnostikované izolace, v níž ve skutečnosti mohou být (zpravidla bývají) místa ve značně pokročilejším stadiu znehodnocení. Takových metod je většina, např. měření izolačního odporu a obecně všech veličin odvozených z měření proudu dielektrikem. Do druhé skupiny patří metody postihující lokální chyby v izolaci. Patří sem např. všechny metody měření částečných výbojů. Některé dovedou poruchu v izolaci skutečně lokalizovat, tj. přibližně určit místo, ve kterém se porucha nachází.

Některé uvádějí celkovou úroveň částečných výbojů v celém objemu izolace, tj. větší či menší množství lokálních chyb, nejsou tedy sumarizující v pravém smyslu slova.

### Efektivní výběr metod

Postupné poruchy se mohou rozvíjet jak z důvodu postupné degradace izolace, tak z důvodu vzniku lokálních nehomogenit, v to počítaje i vakance naplněné plynem. Proto je obecně vhodné aplikovat metody obou skupin. Důležitý je výběr. Má-li být diagnostika efektivní, mělo by být dosaženo cíle s optimálními náklady.

To nás přivádí k otázce, má-li smysl nasazovat několik metod, vycházejících z hodnocení téhož fyzikálního děje v izolaci. Chtělo by se říci: nemá. Není to však tak jednoduché. Odpověď je závislá na tzv. výpovědischopnosti metody, což je pojem poněkud vágní, o němž jsme referovali na tomto místě před čtyřmi roky[9]. Myslí se tím jakási míra zaručenosti či spolehlivosti výroku o stavu izolace podle mínění autora metody nebo uživatelů, kteří udělali s metodou dobrou zkušenost. Správně by to však mělo být chápáno jako míra těsnosti korelace hodnoty diagnostické veličiny s distribucí elektrické pevnosti v čase a při daném elektrickém a teplotním namáhání. Ze skutečnosti, že není definována a kvantifikována výpovědischopnost, plyne snaha aplikovat více metod v dobré víře, že spolehlivost výroku o stavu izolace bude

lepší (všimneme si, že opäť nedefinovaná). Zrejme tudy nevede cesta k efektívnej diagnostike.

#### Efektívni aplikácie súboru diagnostických metód

Prihlédneme-li k shora nastínenej situácii a smírieme-li sa s tým, že kvantifikácia výpovedišchopnosti u všetkých metód nebude v dohľadnej dobe k dispozícii, môžeme doporučiť tento postup:

vybrať metódy, s ktorými jsou u daného stroja dobré skúsenosti,

preferovať metódy s kvantifikovateľnou výpovedišchopnosťou, merať v pravidelných intervaloch s cieľom získať časovú radu, z ktorej zistíme tendenciu zmeny danej veličiny (tendencia napovedá o zmene stavu izolácie, obchádza sa tak naše neznalosť kvantifikácie výpovedišchopnosti),

merať vždy za rovnakých podmienok, najmä pri rovnakej teplote (mnohé diagnostické veličiny jsou silne závislé na teplote, rovněž však na napätí, popř. kmitočte), popř. změřené údaje přepočítávat na referenční teplotu,

merať raději závislosti diagnostické veličiny na napätí, na teplote, na frekvenci (závislost je spojitá čára, ktorou lze snadněji vyrovnat matematickými metodami než jednotlivá měření. Ta mohou být zatížena velkými chybami.).

#### Literatura

- [1] Zališ, K.: Vývoj nového měřiče částečných výbojů., 9. MVK Technika vysokých napětí, Košice 1999
- [2] Mrázek, J.: Teplotní závislosti stejnosměrných a střídavých charakteristik technických dielektrik., 9. MVK Technika vysokých napětí, Košice 1999
- [3] Mentlík, V.: Entalpie jako ukazatel stárnutí kompozitů., 9. MVK Technika vysokých napětí, Košice 1999
- [4] Cimbala, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov, monografia, Košice 2007
- [5] Šandrik, P. – Zlatovský, J.: Časové zmeny diagnostických veličin izolačného systému., Diagnostika '99, Plzeň 1999
- [6] Hammer, M.: Diagnostic of Electric Machines Insulation System and Cluster Analysis, Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina 1998
- [7] Lang, J.: Drážková sonda – nový přístup k detekci výbojové činnosti v alternátorech, Diagnostika '97, Plzeň 1997
- [8] Šandrik, P. – Zlatovský, J. – Lelák, J.: Teplotné závislosti dielektrických parametrov izolácie., Diagnostika '97, Plzeň 1997
- [9] Marton, K. a kol.: Diagnostika vysokonapäťových elektrických strojov., Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina 1996
- [10] Kaláb, P.: Výpovedišchopnosť diagnostických metód., Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina 1996
- [11] Kršňák, I. – Kolcunová, I.: Fázová analýza čiastkových výbojov nameraných na statorovom vinutí vn točivých strojov., Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení, Žilina 1996
- [12] Cimbala, R.: Diagnostický systém pre jednosmernú diagnostiku., 8. MVK Technika vysokých napětí, Stará Lesná 1996
- [13] Lelák, J. – Olach, O.: Starnutie, multifaktorové namahanie a rekvalifikácia silnoprúdových elektrotechnických prvkov a zariadení., 8. MVK Technika vysokých napětí, Stará Lesná 1996
- [14] Šandrik, P. – Zlatovský, J. – Sabela, P.: Vývoj diagnostických parametrov v priebehu doby života izolačného systému., 8. MVK Technika vysokých napětí, Stará Lesná 1996

**Autor:** doc. Ing. Pavel Kaláb, CSc, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky FEKT VUT v Brně, Kolejní 2906/4, 612 00 Brno, Česká republika, tel. +420-5-41149522, E-mail: kalab@utee.feec.vutbr.cz