

# Robustná identifikácia exponenciálnych zložiek signálu s predspracovaním

<sup>1</sup>Imrich ANDRÁŠ, <sup>2</sup>Pavol DOLINSKÝ

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

<sup>1</sup>imrich.andras@tuke.sk, <sup>2</sup>pavol.dolinsky@tuke.sk

**Abstrakt** — Dielektrickú absorpciu reálneho kondenzátora je možné modelovať ideálnym kondenzátorom s paralelnými RC vetvami. Článok prezentuje metódy predspracovania záznamu nabíjacieho prúdu kondenzátora, z ktorého je možné jednotlivé parazitné RC zložky identifikovať jeho rozkladom na základné exponenciály pomocou „Prony-like“ metódy. Navrhnuté metódy predspracovania značne vylepšujú odolnosť „Prony-like“ metódy voči kvantizačnému a tepelnému šumu, ktorý je prítomný v zázname. Optimálne podmienky vzorkovania sú analyzované na simuláciách a navrhnuté metódy predspracovania sú vyskúšané na záznamoch nabíjajúcich prúdov reálnych kondenzátorov.

**Kľúčové slová** — dekompozícia multiexponenciálnych signálov, dielektrická absorpcia, dielektrická diagnostika, model reálneho kondenzátora, Pronyho metóda

## Robust exponential signal component identification with preprocessing

**Abstract** — Dielectric absorption of a real capacitor can be modeled by an ideal capacitor with parallel parasitic RC branches. It is possible to identify these parasitic components by decomposing its charging current into elementary exponential functions using Prony-like method. This paper presents several preprocessing methods to enhance robustness of Prony-like method against quantization and thermal noise present in signal record of charging current. Optimal sampling conditions are analyzed using simulations and the preprocessing methods are tested using charging current records of real capacitors.

**Keywords** — dielectric absorption, dielectric diagnostics, multiexponential signal decomposition, Prony method, real capacitor model

### I. ÚVOD

Polarizácia a depolarizácia v dielektrikách vyvoláva rotáciu molekúl v izolačnom materiáli počas relaxačného procesu. Energetické straty spojené s neideálnym relaxačným procesom molekúl reprezentujú parazitný rezistívny prvok v elektrickom modeli kondenzátora. Starnutie alebo poškodenie izolačných materiálov sa prejavuje ako zmena relaxačných parametrov dielektrika [1], [2]. Dielektrická absorpcia a jej zmena spôsobuje nepresnosti v elektronických obvodoch s precíznymi kondenzátormi, ako sú funkčné generátory, napätím riadené oscilátory či integračné analógovo-číslicové prevodníky (AČP). Na druhú stranu sa dielektrická absorpcia dá využiť na diagnostiku stavu izolácie elektrických vedení a elektrických strojov ako sú výkonové transformátory či motory [3], [4]. Takáto diagnostika môže byť nedeštruktívna, neinvazívna a v porovnaní s tradičným profylaktickým systémom ekonomická. Intervaly údržby alebo výmeny elektrických strojov sú stanovené na základe štatistík, u ktorých sa nedá s určitosťou predpokladať prevádzkové zaťaženie a ostatné podmienky vplyvajúce na životnosť dielektrík. Príčinou toho sú stroje často vymieňané predčasne, alebo

naopak až po poruchách, čo má za následok finančné straty v prevádzkach. Takýmto stavom predísť sa dá vhodnou diagnostikou dielektrík, akou je vyšetrenie dielektrickej absorpcie.

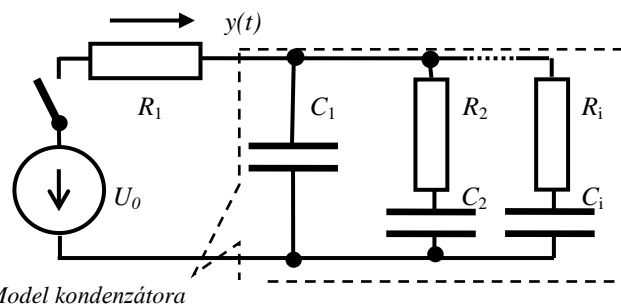
Článok najskôr opisuje dielektrické relaxačné javy a ich vplyv na vlastnosti kapacitorov spolu s modelom chovania reálneho kondenzátora počas nabíjania a vybíjania. Následne je opísaný „Prony-like“ algoritmus pre dekompozíciu zloženého exponenciálneho signálu spolu s navrhnutými metódami predspracovania. Nakoniec sú prezentované experimentálne výsledky dosiahnuté s použitím navrhovaných metód predspracovania pri meraní reálnych kondenzátorov.

## II. DIELEKTRICKÁ RELAXÁCIA REÁLNYCH KONDENZÁTOROV

Dielektrická relaxácia je fyzikálnym javom, ktorý možno modelovať ako je vidieť na Obr. 1, kde  $C_1$  predstavuje ideálnu časť kondenzátora. Ostatné časti v modeli reálneho kondenzátora, ktoré sú modelované paralelnými RC vetvami reprezentujú dielektrické relaxačné procesy. V reálnom kondenzátore so značnou dielektrickou relaxáciou sa náboj na jeho elektródach obnoví potom, ako sa ideálna časť  $C_1$  vybila do parazitných kondenzátorov v paralelných RC vetvách.

Všetky spomínané oblasti, kde relaxačné dipóly vplyvajú na presnosť blokov analógového predspracovania spolu s možnosťou zisťovania starnutia dielektrík vyžadujú presnú identifikáciu parametrov v modeli kondenzátora v Obr. 1.

Meranie komplexnej impedancie s použitím obvodového analyzátoru je základným spôsobom merania vo frekvenčnej oblasti. Alternatívnou metódou je identifikácia všetkých skresľujúcich exponenciálnych zložiek v časovej oblasti. Jej hlavnou výhodou je možnosť použiť relatívne lacné AČP pre záznam  $u(t)$  na testovanom kondenzátore vo fáze nabíjania externým zdrojom  $U_0$ . Celé testovacie pracovisko je zobrazené na Obr. 1.



Obr. 1 Elektrický model dielektrickej absorpcie v kondenzátore a obvod pre testovanie.

Nabíjací prúd je možné vyjadriť funkciou:

$$y(t) = \frac{U_0 - u(t)}{R_1} = A_1 e^{-B_1 t} + \sum_{i=2}^I A_i e^{-B_i t}, \quad \text{kde} \quad \left. \begin{array}{l} A_i = f_i(R_j, C_j, \dots) \\ B_i = g_i(R_j, C_j, \dots) \end{array} \right\} \begin{array}{l} i = 1, \dots, I \\ j = 1, \dots, I \end{array} \quad (1)$$

Analytické riešenie  $I$  diferenciálnych rovníc prvého rádu umožňuje určenie všetkých komponentov  $R_i, C_i$ . Počet exponenciálnych zložiek  $I$  závisí od štruktúry a homogenity dielektrika a tiež času, kedy sa polarizačný proces meria [5], [6]. Ak sú časové konštanty paralelných RC vetiev nesúmeriteľné, parametre  $R_i, C_i$  je možné vypočítať priamo z  $A_i$  a  $B_i$  [7].

Hlavným problémom je identifikácia všetkých exponenciálnych zložiek, k čomu bude využitá poloanalytická „Prony-like“ metóda pre dekompozíciu multiexponenciálnych signálov podľa [8]. Vysoká citlivosť na superponovaný Gaussov a kvantizačný šum je jej hlavnou nevýhodou. Jedným z možných spôsobov vylepšenia robustnosti odhadovania parametrov je číslicové predspracovanie zaznamenaného signálu. S použitím simulačného programu a vygenerovaných multiexponenciálnych signálov so známymi parametrami bolo postupne navrhnutých a overených niekoľko metód. Program umožňoval optimalizovať metódy predspracovania pre rôzne vstupné signály, superponovať šum a meniť rozlíšenie nameraného priebehu.

## III. DEKOMPOZÍCIA MULTIEXPONENCIÁLNEHO SIGNÁLU POMOCOU PRONYHO METÓDY

Uvažujme navzorkovaný a kvantovaný multiexponenciálny signál  $y(kT_s)$ , kde  $T_s$  je vzorkovacia perióda a  $k$  je číslo vzorky ( $k=0, 1, \dots, K-1$ ):

$$y(kT_s) = \left[ \sum_{i=1}^I A_i e^{-B_i k T_s} + g(kT_s) \right] \quad (2)$$

Funkcia  $g(kT_s)$  reprezentuje superponovaný Gaussov šum a hranaté zátvorky kvantizáciu signálu v AČP.

Základná myšlienka Prony-like metódy [9] spočíva v najlepšej aproximácii nameraného vstupného signálu  $y(kT_s)$  pomocou funkcie

$$y(k) = \sum_{i=1}^I \hat{A}_i \mu_i^k, \quad \text{kde} \quad \mu_i = e^{T_s \hat{B}_i}, i = 1, \dots, I \quad (3)$$

Pôvodná analytická metóda určovania činiteľov bola navrhnutá Pronym pre zložené exponenciálne funkcie. Pôvodná metóda je vhodná pre malý počet vzoriek  $K$ , o niečo vyšší ako  $2I$ , kde  $I$  je počet neznámych parametrov ( $K > 2I$ ). V [9] bola prezentovaná upravená metóda pre vysoko preurčený záznam. Hlavnou výhodou je odolnosť voči superponovanému Gaussovmu i kvantizačnému šumu.

*Prony-like metóda pre rovnomerne vzorkovaný signál*

Vysoký počet vzoriek  $K$  meraného signálu  $y(k)$  vedie k preurčenému systému rovníc s  $2I$  neznámymi činiteľmi  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$ :

$$\begin{aligned} \hat{A}_1 + \hat{A}_2 + \dots + \hat{A}_I &= y(0) \\ \hat{A}_1 \mu_1 + \hat{A}_2 \mu_2 + \dots + \hat{A}_I \mu_I &= y(1) \\ \hat{A}_1 \mu_1^2 + \hat{A}_2 \mu_2^2 + \dots + \hat{A}_I \mu_I^2 &= y(2) \\ &\vdots \\ \hat{A}_1 \mu_1^{(K-1)} + \hat{A}_2 \mu_2^{(K-1)} + \dots + \hat{A}_I \mu_I^{(K-1)} &= y(K-1) \end{aligned} \quad (4)$$

Najprv metóda nájde parametre  $\mu_i$  ako korene charakteristickej rovnice

$$\mu^I + C_1 \mu^{I-1} + C_2 \mu^{I-2} + \dots + C_{I-1} \mu + C_I = 0. \quad (5)$$

Činiteľov  $C_i$  určíme riešením sústavy

$$\mathbf{yC} = \mathbf{b}, \quad (6)$$

kde

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & y(2) & \dots & y(I-1) \\ y(1) & y(2) & y(3) & \dots & y(I) \\ y(2) & y(3) & y(4) & \dots & y(I+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(K-I-1) & y(K-I) & y(K-I+1) & \dots & y(K-2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = [-C_I, -C_{I-1}, -C_{I-2}, \dots, -C_1]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = [y(I), y(I+1), y(I+2), \dots, y(K-1)]^T \quad (9)$$

Činiteľov  $\hat{B}_i$  možno vypočítať zo známych koreňov  $\mu_i$ :

$$\hat{B}_i = \frac{1}{T_s} \ln \mu_i \quad (10)$$

Navyše systém rovníc (4) sa tak stane lineárnym a činitelia  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$  môžu byť postupne vypočítaní.

*Číslkové predspracovanie*

Nedostatkom navrhnutého algoritmu je rovnaký vplyv vzoriek z konca záznamu signálu na odhad  $\hat{A}_i$  v sústave (4), ako vplyv vzoriek na začiatku záznamu. Preto boli navrhnuté nové metódy predspracovania, ktoré vylepšujú odolnosť výpočtového algoritmu voči Gaussovmu a kvantizačnému šumu.

Prvou metódou je filtrácia dolnopriepustným filtrom. Výstupný signál  $\bar{y}(k_1)$  je spriemernenou hodnotou  $L$  vzoriek v časovom okamihu  $k'T_s = k'L T_s$  ( $k'=0, 1, \dots, K'$ , kde  $K' = \lfloor K/L \rfloor$ )

$$\bar{y}(k') = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} y(k'L+l) = \sum_{i=1}^I \hat{A}_i (\mu_i^L)^{k'} \left\{ \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \mu_i^l \right\} = \sum_{i=1}^I \frac{(1-\mu_i^L)}{(1-\mu_i)} \frac{1}{L} \hat{A}_i (\mu_i^L)^{k'} = \sum_{i=1}^I \hat{A}'_i (\mu_i^L)^{k'} \quad (11)$$

Výstupný signál pre aproximáciu je podobný ako pôvodná funkcia (3) s novými parametrami signálu:

$$\hat{A}'_i = \frac{(1 - \mu_i^{L/T_s})}{(1 - \mu_i)} \frac{1}{L} \hat{A}_i; \quad \mu'_i = e^{LT_s \hat{B}_i} = e^{T_s \hat{B}_i} \quad (12)$$

Filtrovaný signál sa používa pre odhad špičkových hodnôt a exponenciálnych zložiek. Potom sa tieto parametre použijú pre odhad  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$  s použitím vzťahu (12).

Druhá metóda predspracovania využíva integráciu záznamu (3), ktorá umožňuje potlačenie superponovaného šumu. Ďalšou z výhod tejto metódy je vylepšenie odhadu špičkových hodnôt  $A_i$  pri malých hodnotách  $B_i$ . Integrovaný vstupný prúd (2) za predpokladu nulovej strednej hodnoty superponovaného šumu  $\bar{g}(kT_s) = 0$  možno vyjadriť ako

$$Y(k) = \int_0^{kT_s} y(x) dx = \sum_{i=1}^l \frac{A_i}{B_i} [1 - e^{-B_i kT_s}] \quad (13)$$

Záznam  $y(k)$  možno integrovať numericky s použitím lichobežníkového pravidla. Signál reprezentovaný ako súčet klesajúcich exponenciálnych funkcií sa získa odčítaním integrovaného záznamu od jeho konečnej hodnoty ( $t \rightarrow \infty$ ). Spôsob odhadu popísaný v sekcii 2 možno použiť pre pravú stranu v rovnici (4) rovnú

$$Y_b(k) = Y(\infty) - Y(k). \quad (14)$$

Činiteľov  $\hat{B}_i$  exponenciál možno vypočítať z odhadnutých koreňov  $\mu_i$  použitím vzťahu (10). Potom špičkové hodnoty  $\hat{A}_i$  nabíjacieho prúdu  $y(t)$  sú odhadnuté zo špičkových hodnôt  $\hat{A}_{bi}$  multiexponenciálnej funkcie  $Y_b(k)$  pomocou

$$\hat{A}_i = \hat{A}_{bi} \hat{B}_i \quad (15)$$

#### IV. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

Účinnosť všetkých navrhnutých metód predspracovania a odhad pomocou „Prony-like“ metódy boli odskúšané s využitím softvérovej simulácie navrhnutej v prostredí LabVIEW.

Pre všetky simulácie bol použitý rovnaký testovací signál, generovaný podľa (2) s využitím parametrov v Tabuľke 1, pričom  $g(kT_s) = 0, T_s = 10^{-3}$  s, dĺžka záznamu 0,5s, signál bol kvantovaný simulovaným unipolárnym AČP s rozlíšením 18 bitov a plným rozsahom  $FSR = 10$ , kým nie je uvedené inak. Použitý bol spriemerňujúci filter opísaný v (12) s dĺžkou  $L = 64$ , preto sa pôvodná vzorkovacia perióda zmenila na  $T_s L$ .

Tabuľka 1  
Parametre testovacieho multiexponenciálneho signálu

$i$	1	2	3	4
$A_i$	4,95	0,07	0,1	0,07
$B_i(\text{s}^{-1})$	30	7	1,5	0,3

Pre meranie úspešnosti odhadu parametrov signálu bola použitá stredná kvadratická chyba (MSE), počítaná ako

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} [\hat{y}(kT_s) - y(kT_s)]^2, \quad (16)$$

kde  $y(kT_s)$  je testovací signál a  $\hat{y}(kT_s)$  je signál generovaný podľa (2) s využitím odhadovaných činiteľov  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$ .

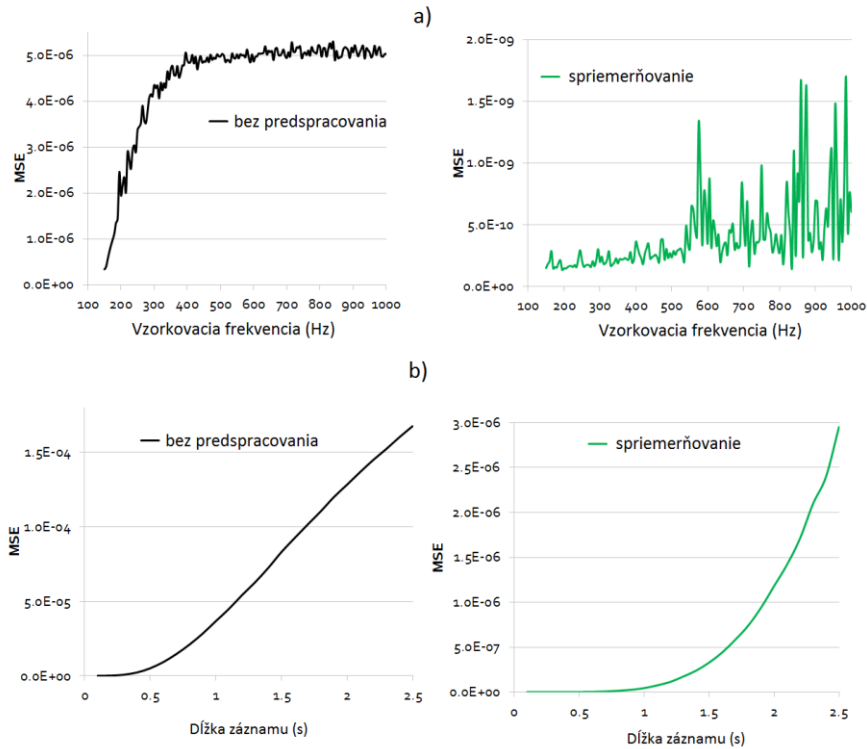
#### Dĺžka záznamu

Všetky vzorky v zázname majú podobný vplyv na odhad  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$ . Šum na konci signálu zhoršuje odhad, hlavne s rastúcou dĺžkou záznamu a klesajúcou úrovňou vyšších exponenciálnych zložiek v (2). Preto má dĺžka záznamu značný vplyv na presnosť, tak ako ukazuje Obr. 2a.

Treba spomenúť, že kratší záznam zdanlivo zanecháva nižšiu chybu. Menší počet vzoriek pre sústavu (4) spôsobí nepresný odhad vyšších parametrov  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$ . Vplyv týchto vyšších parametrov na okamžitú amplitúdu je na počiatku zanedbateľný a postupne sa s časom zväčšuje. Preto by mala dĺžka

záznamu byť kompromisom: dostatok vzoriek pre zachytenie podstatnej časti exponenciály, ale tak aby sa nebrali do úvahy malé zašumené vzorky z jej konca. Jedinou úlohou vzorkovacej frekvencie podľa Obr.2b je jej vzťah k počtu vzoriek pri danej dĺžke záznamu, predpokladajúc, že je dostatočne veľká pre zachytenie počiatočného sklonu signálu.

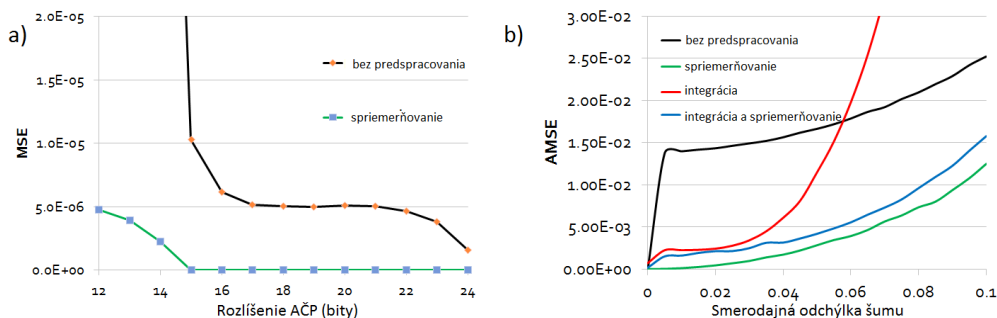
Experimenty ukázali, že pre presný odhad šiestich exponenciál (dostatok pre reálne kondenzátory), je vhodné záznam useknúť v bode, kde jeho úroveň klesne pod  $10^{-3}$  násobok počiatočnej hodnoty. Obr. 2a ukazuje, že spriemerňujúci filter s  $L=64$  zvyšuje presnosť pre dlhé záznamy, čo určitým spôsobom znižuje požiadavky na AČP.



Obr. 2 Závislosť strednej kvadratickej chyby exponenciálneho signálu aproximovaného pomocou Prony-like metódy od a) dĺžky záznamu, b) vzorkovacej frekvencie.

### Rozlíšenie AČP

Rozlíšenie AČP má najväčší dopad na odhad, ak je záznam dostatočne dlhý aby kvantizačný šum prevýšil okamžitú úroveň signálu. Čím je rozlíšenie AČP horšie, tým kratší záznam je potrebné použiť. Obr. 3a ukazuje závislosť strednej kvadratickej chyby od rozlíšenia AČP pri konštantnej dĺžke záznamu bez predspracovania a s použitím spriemerňujúceho filtra (11). Je zrejmé, že znižovaním rozlíšenia pod určitý bod chyba pri odhadovaní prudko narastie. Ako možno na Obr. 3a vidieť, podobne ako v predchádzajúcom prípade, že spriemerňujúci filter značne zlepšuje presnosť potlačením kvantizačného šumu.



Obr. 3 Závislosť strednej kvadratickej chyby exponenciálneho signálu aproximovaného pomocou Prony-like metódy od a) rozlíšenia AČP, b) smerodajnej odchýlky aditívneho šumu.

### Aditívny Gaussov šum

Pre vyhodnotenie navrhnutých metód bol pridaný k signálu (2) pred kvantizáciou Gaussov šum a bola spočítaná priemerná stredná kvadratická chyba (AMSE) zo 100 simulácií. Výsledky pre každú metódu predspracovania sú uvedené v Obr. 3b.

Vysoká citlivosť Prony-like metódy na šum je viditeľná a ako sa očakávalo, už pri nízkych úrovniach šumu je chyba odhadu parametrov  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$  značná. Pre vysoké pomery signál-šum (SNR>45dB) je možné pre zmenšenie chyby použiť integráciu (14). Aj keď je táto metóda výpočtovo jednoduchá, vnáša do signálu ďalšie skreslenie, čo spôsobuje malú chybu aj v prípade nulovej úrovne šumu. V prípade SNR<38dB je chyba dokonca väčšia ako bez predspracovania.

Najvýhodnejšia z navrhnutých metód je spriemerňovanie (12). Počet spriemerných vzoriek  $L$  by mal byť vhodne zvolený podľa konkrétnej aplikácie. Vo všeobecnosti spriemerňovanie značne redukuje chybu odhadu, ak uvažujeme všetky zdroje nepresnosti, dokonca aj lineárne skreslenie spôsobené integráciou.

### Merania na reálnych kondenzátoroch

Autori vykonali merania na niekoľkých typoch reálnych kondenzátorov, aby mohli zvoliť vhodný testovací signál pre simulácie. Kondenzátory boli nabité na 5V a následne vybité cez rezistor 82kΩ. Napätie na kondenzátore bolo merané pomocou AČP s rozlíšením 18 bitov, FSR ±5V a vzorkovacou frekvenciou 10kHz. Namerané signály boli zdecimované faktorom 2 a predspracované použitím spriemerňujúceho filtra s  $L=64$ . Záznam bol useknutý v okamihu, keď jeho úroveň klesla pod 5mV, aby sa eliminovali malé zašumené vzorky (celkové SNR pred spriemernením bolo asi 80dB). Filtrovaný a skrátený záznam bol potom analyzovaný pomocou Prony-like metódy, pričom sa odhadovali 4 exponenciálne zložky, ktorých parametre sú spísané v Tabuľke 2.

Z výsledkov možno usúdiť, že kondenzátory s dielektrikom z metalizovaného polypropylénu (MKP) sú najbližšie ideálnym, s dominantnou prvou exponenciálou a malými exponenciálami vyššieho rádu. Zaujímavý je kondenzátor od výrobcu Arcotronic, kde 3. a 4. vypočítaná zložka má rovnakú (zanedbateľnú) hodnotu, z čoho vyplýva, že v skutočnosti sú tu zrejme iba dve exponenciálne zložky. Tantalový kondenzátor a kondenzátor s dielektrikom z metalizovaného polyesteru (MKT) vykazujú o niečo väčšie parazitné zložky ako MKP.

Tabuľka 2  
Parametre reálnych kondenzátorov vypočítané Prony-like metódou so spriemerňujúcim filtrom

Typ kondenzátora	$i$	1	2	3	4
Tesla MKT 330nF	$A_i(V)$	4,887	0,108	0,004	0,003
	$B_i(s^{-1})$	40,647	31,172	0,406	152,465
	MSE	6,80.10 <sup>-09</sup>			
Arcotronic MKP 470nF	$A_i(V)$	4,997	0,004	-7,4E-05	-7,4E-05
	$B_i(s^{-1})$	29,502	0,099	7,65	7,65
	MSE	5,14.10 <sup>-09</sup>			
Vishay MKP 470nF	$A_i(V)$	4,986	0,011	0,005	2E-04
	$B_i(s^{-1})$	26,12	45,42	0,0765	95,873
	MSE	1,52.10 <sup>-09</sup>			
- Tantalový 470nF	$A_i(V)$	4,786	0,079	0,127	0,007
	$B_i(s^{-1})$	25,617	13,157	50,672	0,745
	MSE	4,20.10 <sup>-08</sup>			
Tesla MP 1000nF TC180	$A_i(V)$	2,641	1,466	0,793	0,096
	$B_i(s^{-1})$	7,617	16,245	1,738	50,771
	MSE	1,05.10 <sup>-07</sup>			
- Hlinikový elektrolyt 1000nF	$A_i(V)$	2,972	1,973	0,03	0,024
	$B_i(s^{-1})$	12,801	16,383	1,714	64,193
	MSE	2,60.10 <sup>-08</sup>			

V prípade hliníkového elektrolytického kondenzátora a kondenzátora z metalizovaného papiera (MP) boli výsledky veľmi ďaleko od ideálnych, pričom primárna kapacita je viditeľne rozdelená do dvoch až troch zložiek. V prípade kondenzátora Tesla MP má ešte aj štvrtá zložka značnú hodnotu, z čoho možno usúdiť, že by bol potrebný rozklad na viac ako 4 exponenciály.

#### V. ZÁVER

Článok prezentuje výhody rôznych metód predspracovania signálu s cieľom vylepšenia odolnosti „Prony-like“ metódy pre dekompozíciu zložených multiexponenciálnych signálov. Prevedené simulácie a experimenty ukázali, že najlepšie výsledky je možné dosiahnuť spriemerňovaním záznamu s použitím optimálneho redukčného faktora. Alternatívna metóda založená na integrácii záznamu je vhodná pre signály s miernou úrovňou šumu.

#### POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu „Rozvoj Centra informačných a komunikačných technológií pre znalostné systémy (kód ITMS: 26220120030), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“ a vďaka podpore projektu KEGA č. 015TUKE-4/2016.

#### LITERATÚRA

- [1] Koval', F., Cimbala, R.: IRC Analysis of insulation systems. Acta Electrotechnica et Informatica, No. 4, Vol. 7, 2007, pp. 1-7.
- [2] Hofmann R., Kranz H.G., Steinbrink D.: IRC-Analysis: Destruction free dielectric diagnosis of mechanical and service aged polymeric insulation. ISH 1999, Conference Publication No 467, 1999A.B. Smith, C.D. Jones, and E.F. Roberts, "Article Title," *Journal*, Publisher, Location, pp. 1-10, Date. Jones, C.D., A.B. Smith, and E.F. Roberts, *Book Title*, Publisher, Location, Date.
- [3] Hoff, G., Kranz, H.G.: On-site dielectric diagnostics of power cables using the isothermal relaxation current measurements. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 January, 2000. ISBN 0-7803-5935-6.
- [4] Cigre Task Force 15.01.09: Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 3, 2003, pp. 12 - 18. ISSN 0883-7554.
- [5] Michaeli, L., Šaliga, J., Godla, M., Lipták, J.: Measurement of Dielectric Absorption of Capacitors by Signal Decomposition. Proc. of IMEKO TC-4 Symposium, Benevento 2014, pp. 107-111.
- [6] Michaeli, L., Šaliga, J., Godla, M., Lipták, J., Kollár, I.: Measurement of distorted exponential signal components using maximum likelihood estimation, Measurement. Vol. 58 (2014), p. 503-510. - ISSN 0263-2241
- [7] Michaeli, L., Šaliga, J., Lipták, J., Buša, J., Cimbala, R.: Dielectric Parameters Estimation by the Measurement of the Relaxation Current. XXI IMEKO World Congress „Measurement in Research and Industry“, August 30 – September 4, 2015. Prague, Czech Republic.
- [8] Šaliga, J., Michaeli, L., Sakmár, M., Buša, J.: Processing of bidirectional exponential stimulus in ADC testing, Measurement. Vol. 43, no. 8 (2010), p. 1061-1068. - ISSN 0263-2241
- [9] Coluccio, A. Eisingberg, G. Fedele: "A Prony-like method for non-uniform sampling," Signal Processing, Vol. 87, No. 10, 2007, pp. 2484-2490..