

Andrzej BŁACHOWICZ\*  
Paweł KURTASZ\*\*

## **ANALIZA TEORETYCZNA CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO PROPAGOWANEGO PRZEZ STRUKTURĘ MODELU FIZYCZNEGO KONDENSATORA ELEKTROENERGETYCZNEGO**

W artykule przedstawiono wyniki analizy teoretycznej wykonanej przy użyciu symulacji komputerowych opierających się na metodzie elementów skończonych. Analizy dotyczą propagacji fali akustycznej emitowanej ze źródła punktowego przez strukturę fizyczną kondensatora elektroenergetycznego. W obszarze badań było wyznaczenie drogi propagacji fali akustycznej w postaci ciśnienia akustycznego w danych punktach modelu, emitowanego z punktowego źródła fali akustycznej o zadanych właściwościach. Przeprowadzono analizy zmian ciśnienia akustycznego w strukturze obiektu symulowanego jak również w jego okolicy. Na podstawie uzyskanych rezultatów uzyskano analityczny, akustyczny model przestrzenny kondensatora elektroenergetycznego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kondensator, wyładowania niezupełne, (metoda) analiza elementów skończonych

### **1. WPROWADZENIE**

Jedną z najczęstszych przyczyn występowania awarii w systemie energetycznym są defekty i trwałe uszkodzenia układów izolacyjnych powodowane procesami starzenia się i degradacji izolacji. Defektom izolacji towarzyszy niekorzystne zjawisko wyładowań niezupełnych (WNZ), których występowanie przyczynia się do przyspieszenia procesu degradacji układów izolacyjnych [1], w szczególności dotyczy to układów izolacji papierowo-olejowej. Długotrwałe WNZ prowadzą w konsekwencji do przebicia materiału izolacyjnego, czego skutkiem jest trwałe uszkodzenie układu izolacyjnego urządzenia elektroenergetycznego. W celu zapobiegania konieczności, nagłego i awaryjnego odłączenia obiektu prowadzi się okresową diagnostykę stanu jego układu izolacyjnego. W praktyce diagnostycznej wykorzystywane są zarówno metody inwazyjne, wymagające odłączenia badanego urządzenia, jak również coraz częściej metody nieinwazyjne (on-line). Generacji WNZ towarzyszy szereg zjawisk fizycznych, do których można zaliczyć: emi-

---

\* Olatech, Opole.

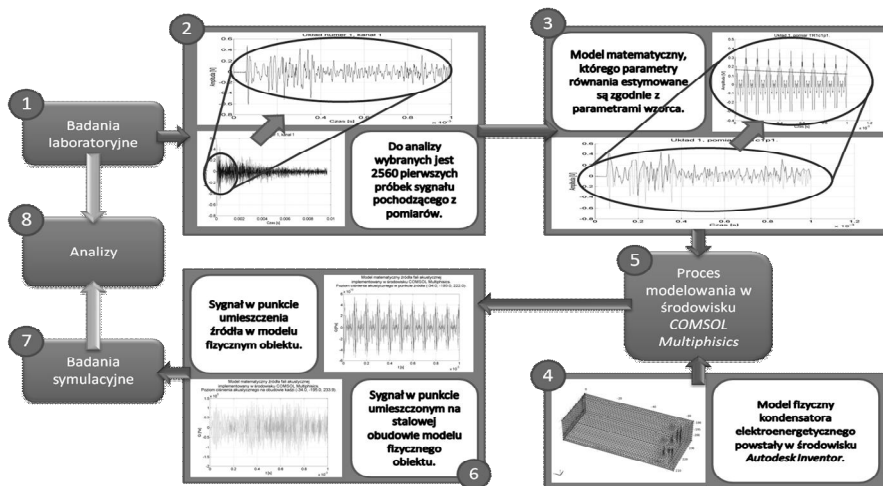
\*\* BlueSoft Smart Technologies Cluster, Sp. z o.o, Opole.

sja fali elektromagnetycznej, impulsy prądowe, emisję fali akustycznej, emisję promieniowania świetlnego itd. Na ich podstawie opracowano następujące metody diagnostyki układów izolacyjnych: metoda elektryczna inwazyjna i nieinwazyjna [2, 3], chromatografia gazowa [4, 5], szerokopasmowa metoda *UHF* (ang. *Ultra High Frequency*) lub *VHF*, (ang. *Very High Frequency*) [6], detekcja sygnałów emisji akustycznej (EA) [7] oraz optycznej [8].

Tematyką artykułu jest zastosowanie modelowania matematycznego, zarówno do opisu źródła sygnału EA od WNZ, jak również drogi ich propagacji w układach izolacyjnych kondensatorów elektroenergetycznych średniego napięcia (ŚN), wykorzystywanych do kompensacji mocy biernej. W tym celu zastosowano model trójwymiarowy, który umożliwia przeprowadzenie analiz rozkładu ciśnienia akustycznego zarówno wewnątrz struktury rozpatrywanego obiektu, jak również został wykorzystany do wyznaczenia map rozkładu ciśnienia na płaszczyznach tworzących obudowę kondensatora.

## 2. CHARAKTERYSTYKA PROWADZONYCH BADAŃ

Na rys. 1 przedstawiono poszczególne etapy badań zmierzających do uzyskania analiz korelacyjnych sygnałów rejestrowanych w etapie badań laboratoryjnych i badań prowadzonych podczas realizacji symulacji numerycznych.



Rys. 1. Etapy przeprowadzonych badań i analiz sygnałów EA od WNZ

Przeprowadzone badania podzielono na następujące etapy:

- 1) badania laboratoryjne, które wykonano dla kilku konfiguracji dróg propagacji sygnałów EA generowanej przez WNZ klasy 3, wykorzystując do tego celu zwijki kondensatorowe,

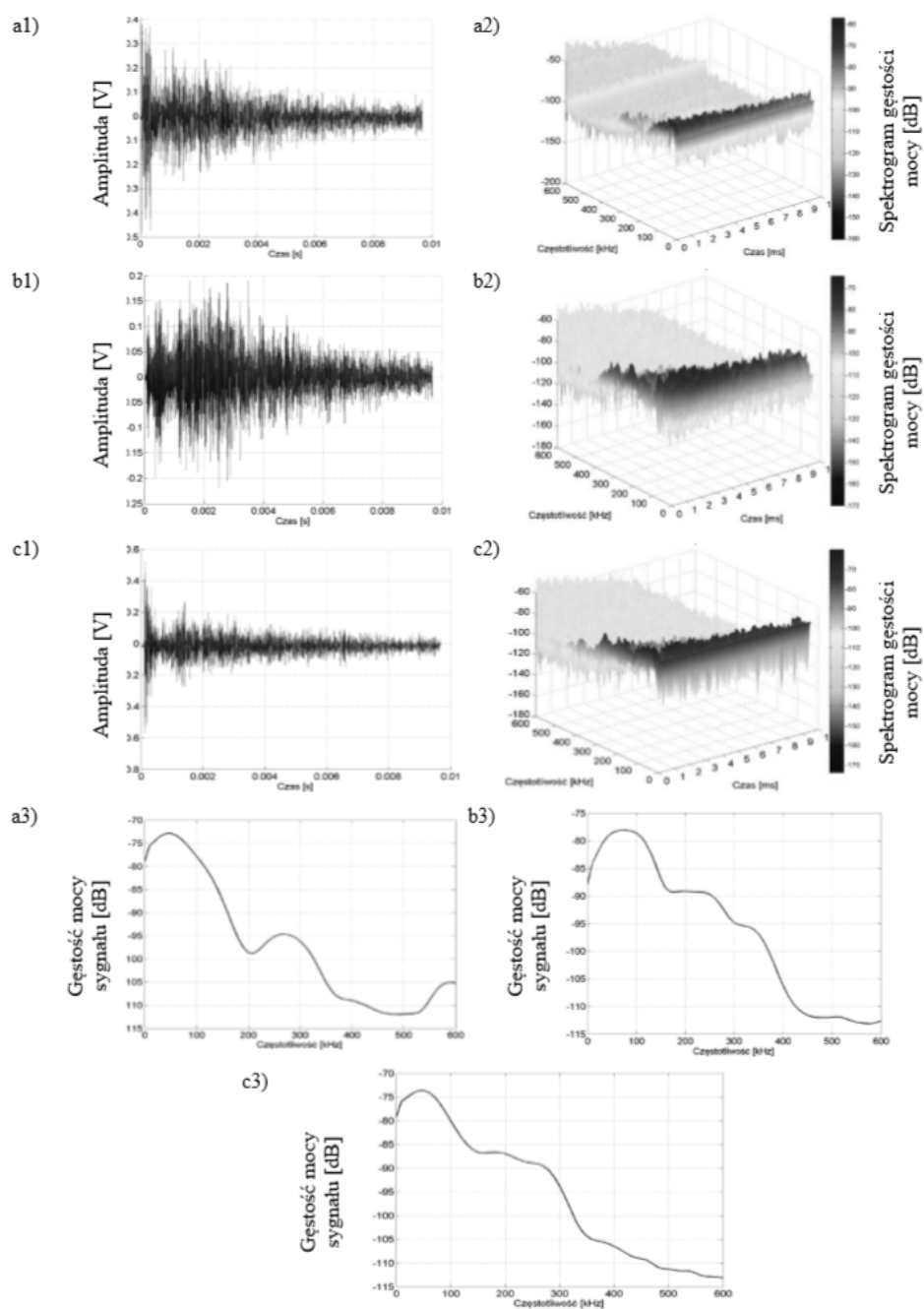
- 2) zarejestrowane sygnały EA, formowano i wstępnie przetwarzano w celu estymacji parametrów równania modelu matematycznego, przy pomocy autorskiego oprogramowania,
- 3) estymacja parametrów modelu matematycznego źródła sygnałów EA opracowanego na podstawie wzorca uzyskanego z badań laboratoryjnych, który wykorzystano podczas symulacji numerycznych w przestrzeni trójwymiarowej,
- 4) opracowanie modelu 3D kondensatora elektroenergetycznego w środowisku *Autodesk Inventor*,
- 5) przeprowadzenie symulacji numerycznych przy wykorzystaniu oprogramowania *COMSOL Multiphysics*,
- 6) analiza wyników badań symulacyjnych dla wyznaczonej drogi propagacji sygnałów EA – autorskie oprogramowanie opracowane w *Matlab*,
- 7) przeprowadzenie analiz sygnałów EA wyznaczonych na podstawie badań symulacyjnych,
- 8) wykonanie analiz korelacyjnych w dziedzinie czasu i częstotliwości sygnałów EA uzyskanych z badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych, które przeprowadzono dla analogicznych obszarów modelu symulacyjnego i laboratoryjnego.

### **3. ANALIZY SYGNAŁÓW EA OD WNZ UZYSKANYCH PODCZAS BADAŃ LABORATORYJNYCH I ESTYMACJI PARAMETRÓW MODELU MATEMATYCZNEGO ŹRÓDŁA SYGNAŁU EA**

#### **3.1. Przebiegi czasowe, spektrogramy gęstości mocy i widma gęstości mocy sygnałów EA generowanej przez WNZ podczas badań laboratoryjnych**

Na rys. 2 przedstawiono wybrane przykładowe przebiegi czasowe, spektrogramy gęstości mocy i widma gęstości mocy, które wyznaczono dla sygnałów EA zarejestrowanych podczas badań laboratoryjnych przeprowadzonych w układzie modelującym drogę propagacji sygnałów EA generowanych przez WNZ klasy 3.

Sygnały EA zostały zarejestrowane w trzech kanałach pomiarowych, gdzie do kanału 1 podłączono piezoelektryczny szerokopasmowy przetwornik stykowy (rys. 2 a), do kanału 2 podłączono hydrofon 1, znajdujący się przy źródle WNZ (rys. 2 b), a do kanału 3 odpowiednio hydrofon 2 znajdujący się za układem izolacyjnym na rozpatrywanej drodze propagacji (rys. 2 c). Na charakterystykach czasowych kolorem niebieskim zaznaczono zarejestrowany przebieg sygnału EA, natomiast kolorem czerwonym oznaczono jego obwiednię.

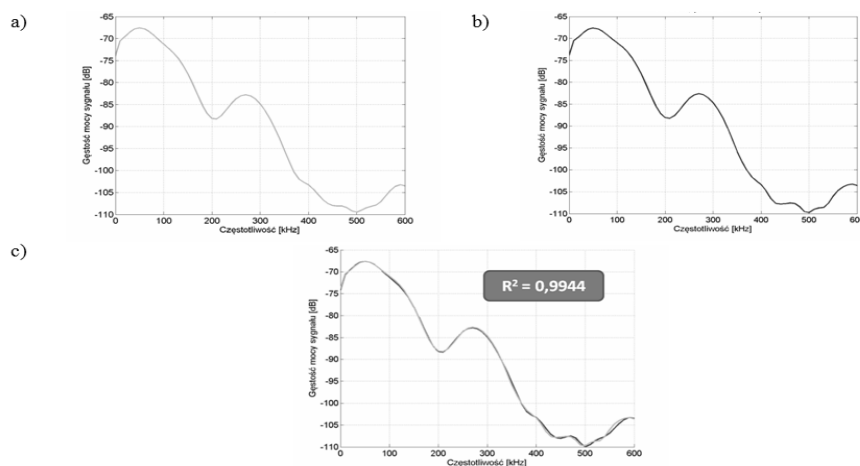


Rys. 2. Widma gęstości mocy sygnałów EA generowanej przez WNZ, gdzie: kanał 1 (a), kanał 2 (b) i kanał 3 (c) karty pomiarowej

### 3.2. Analiza częstotliwościowa sygnałów EA generowanych przez WNZ pochodzących z badań laboratoryjnych i estymowanych modelem matematycznym

Dla sygnałów EA rejestrowanych bezpośrednio przy źródle i sygnałów uzyskanych poprzez estymację parametrów modelu matematycznego otrzymano charakterystyczne przebiegi widm gęstości mocy, które zamieszczono na rys. 3. Dodatkowo w celach porównawczych na rys. 3c zestawiono widma gęstości mocy obu sygnałów.

Jednym z kryteriów oceny porównawczej uzyskanych wyników w procesie wyznaczania wartości parametrów modelu matematycznego (m.in.  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  i wartości amplitud każdej z 60-ciu harmonicznych tworzących modelowany sygnał, wzór 3) była korelacja wzajemna widm gęstości mocy sygnału. Na rys. 3a przedstawiono widma gęstości mocy sygnału rejestrowanego podczas pomiarów laboratoryjnych. Natomiast na rys. 3b zaprezentowano widma gęstości mocy sygnałów uzyskanych poprzez estymację parametrów modelu matematycznego zgodnie z wzorcowym sygnałem EA. Do wyznaczenia parametrów równania wykorzystano oprogramowanie przygotowane w środowisku *Matlab*. Wskaźnik determinacji dla widm gęstości mocy sygnału EA generowanego przez WNZ (rys. 3) wyniósł  $R^2 = 0,9944$ .



Rys. 3. Charakterystyki dla **układu nr 1**, pomiar **tr1p1**, gdzie: a) widmo gęstości mocy sygnału EA zarejestrowanego podczas badań laboratoryjnych, b) widmo gęstości mocy sygnału uzyskane poprzez estymację parametrów modelu matematycznego zgodnie ze wzorcem z rys. a), c) zestawienie porównawcze charakterystyk a) i b)

Wysoka wartość wskaźnika determinacji  $R^2$  dla widm gęstości mocy, na poziomie zbliżonym do jedności, świadczy o korelacji obu sygnałów. Tak przygotowany

sygnał, w postaci estymowanego modelu matematycznego, został zaimplementowany w środowisku *COMSOL Multiphysics* podczas badań symulacyjnych.

Analizując szerokość pasm widm gęstości mocy zamieszczonych na rys. 3 można stwierdzić, że niezależnie od procesu estymacji parametrów modelu matematycznego, zarówno charakter przebiegu widma jak również szerokość pasma nie ulega znaczącym zmianom. Znalazło to potwierdzenie w obliczonych wartościach wskaźnika determinacji wyznaczonego dla widm, która dla wszystkich analizowanych modeli matematycznych sygnałów zbliżona jest do jedności (tab. 1).

Tabela 1. Wartości współczynników determinacji wyznaczone dla wyników kilku przykładowych analiz

| Lp. | Układ | Kanał karty pomiarowej | Pomiar | Wartość wskaźnika determinacji $R^2$ |
|-----|-------|------------------------|--------|--------------------------------------|
| 1.  | 1     | 2 (hydrofon 1)         | tr1p1  | 0,9943                               |
| 2.  |       |                        | tr1p2  | 0,9991                               |
| 3.  |       |                        | tr1p3  | 0,9901                               |
| 4.  |       |                        | tr1p4  | 0,9981                               |
| 5.  |       |                        | tr1p5  | 0,9855                               |

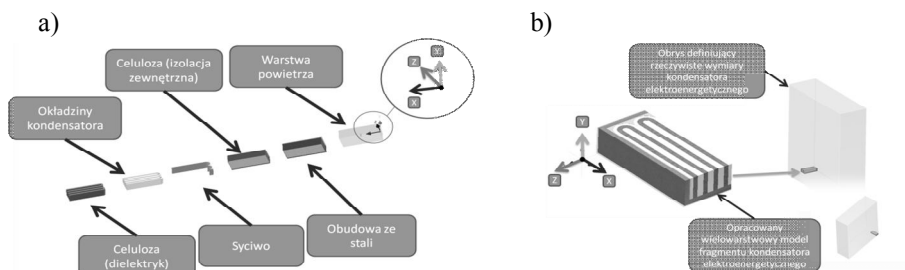
## 4. MODEL NUMERYCZNY

### 4.1. Modelowany fragment kondensatora elektroenergetycznego

Na rys. 4 zaprezentowano budowę opracowanego modelu trójwymiarowego fragmentu kondensatora elektroenergetycznego, który wykorzystano w przeprowadzonych symulacjach numerycznych. Prezentowany model składa się z następujących ośrodków propagacji fal EA:

- powietrze (zewnątrzna warstwa otaczająca model kondensatora elektroenergetycznego),
- obudowa wykonana ze stali,
- celuloza (izolacja oddzielająca elementy czynne kondensatora od stalowych elementów obudowy),
- syciwo kondensatorowe,
- okładziny kondensatora,
- warstwa celulozy (dielektryka będącego elementem czynnym kondensatora, elementy tworzące zwijki kondensatorowe).

Każda z wymienionych warstw posiada parametry, istotne dla procesu modelowania, które w sposób jednoznaczny charakteryzują jej własności fizyczne. Dla tworzonego modelu szczególne znaczenie mają takie zjawiska fizyczne jak: propagacja, załamanie, odbicie i tłumienie fal EA generowanych przez WNZ.



Rys. 4. Budowa modelu 3D kondensatora elektroenergetycznego, gdzie: a) widok poszczególnych warstw tworzących model, b) widok modelu fragmentu kondensatora elektroenergetycznego i jego rozmieszczenie w obrysie objętości całego obiektu

Tabela 2. Zestawienie wartości parametrów i własności poszczególnych obszarów modelu numerycznego

| Lp. | Obszar modelu   | Parametry / własności obszaru   |
|-----|---|---|
| 1   | Powietrze   | Gęstość: $\rho(pA, T)$ {predefiniowana funkcja temperatury}<br>Prędkość dźwięku: $cs(T)$ {predefiniowana funkcja temperatury}<br>Predefiniowany materiał: Air {powietrze} |
| 2   | Obudowa wykonana ze stali   | Gęstość: $7850 \text{ kg/m}^3$<br>Prędkość dźwięku: $5000 \text{ m/s}$<br>Predefiniowany materiał: Steal AISI 4340 {stal AISI 4340}                                       |
| 3   | Celuloza (dielektryk bierny)  | Gęstość: $\rho(T)$ {predefiniowana funkcja temperatury}<br>Prędkość dźwięku: $4890 \text{ m/s}$<br>Predefiniowany materiał: Cellulose {celuloza}                          |
| 4   | Syciwo kondensatorowe (wykorzystano predefiniowany olej transformatorowy) | Gęstość: $\rho(T)$ {predefiniowana funkcja temperatury}<br>Prędkość dźwięku: $1350 \text{ m/s}$<br>Predefiniowany materiał: Transformer oil {olej transformatorowy}       |
| 5   | Okładziny kondensatora (materiał tworzący zwijki)                         | Gęstość: $2700 \text{ kg/m}^3$<br>Prędkość dźwięku: $6300 \text{ m/s}$<br>Predefiniowany materiał: Aluminum {aluminium}   |
| 6   | Celuloza (dielektryk czynny, materiał tworzący zwijki)                    | Gęstość: $\rho(T)$ {predefiniowana funkcja temperatury}<br>Prędkość dźwięku: $4890 \text{ m/s}$<br>Predefiniowany materiał: Cellulose {celuloza}                          |

W praktyce istnieje konieczność wyznaczenia takich wartości parametrów fizycznych i konfiguracyjnych aby możliwe było uzyskanie jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych wyników prowadzonych symulacji. Należy jednak podkreślić, że parametry tworzonego modelu mają charakter przybliżony, co może wpływać na rozbieżność między warunkami rzeczywistymi, a przyjętymi

podczas symulacji. W tabeli 2 zestawiono wartości przyjętych parametrów opisujących poszczególne obszary modelu w środowisku *COMSOL Multiphysics*.

Wymiary geometryczne modelu przestrzennego i gęstość siatki dyskretyzacyjnej determinuje ilość punktów tworzących siatkę dyskretyzacyjną. Natomiast gęstość siatki dyskretyzacyjnej uzależniona jest od częstotliwości harmonicznych składowych sygnału akustycznego modelowanego podczas symulacji (tab. 3).

Tabela 3. Zestawienie parametrów siatki dyskretyzacyjnej w zależności od własności częstotliwościowych źródła sygnału EA, gdzie:  $f$  – częstotliwość,  $T$  – okres,  $\lambda$  – długość fali,  $d$  – odległość elementów siatki, od 2 do 5-ciu punktów obliczeniowych na jedną długość fali

| Lp. | $f$<br>[kHz] | $T$<br>[ $\mu$ s] | $\lambda$<br>[mm] | $d$<br>[mm]     |
|-----|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1   | 50           | 20                | 27,8              | 5,56–13,9       |
| 2   | 100          | 10                | 13,9              | 2,78–6,95       |
| 3   | 200          | 5                 | 6,95              | 1,39–3,475      |
| 4   | 300          | 3,33              | 4,6287            | 0,92574–2,31435 |
| 5   | 400          | 2,5               | 3,475             | 0,695–1,7375    |
| 6   | 500          | 2                 | 2,78              | 0,556–1,39      |
| 7   | 600          | 1,66              | 2,3213            | 0,46426–1,16065 |

#### 4.2. Model matematyczny źródła fali EA

Model matematyczny sygnału EA implementowany w symulacjach wyróżniono równaniem (3) [9, 10]. Model matematyczny posiada dwa elementy składowe. Pierwsza część (1) jest iloczynem funkcji krzywej sigmoidalnej i funkcji eksponentyjnej, która opisuje obwiednię sygnału EA, formując kształt jej czoła i wygaszenie. Druga część (2) opisuje periodyczność sygnału EA przy pomocy sumy harmonicznych kosinusoidalnych, kształtując w ten sposób wypadkową częstotliwość.

$$y_{SE}(t) = \frac{A_1}{1 + e^{-A_2(t-\mu_2)}} e^{-A_3(t-\mu_2)} \quad \left. \vphantom{y_{SE}(t)} \right\} \text{Część pierwsza} \quad (1)$$

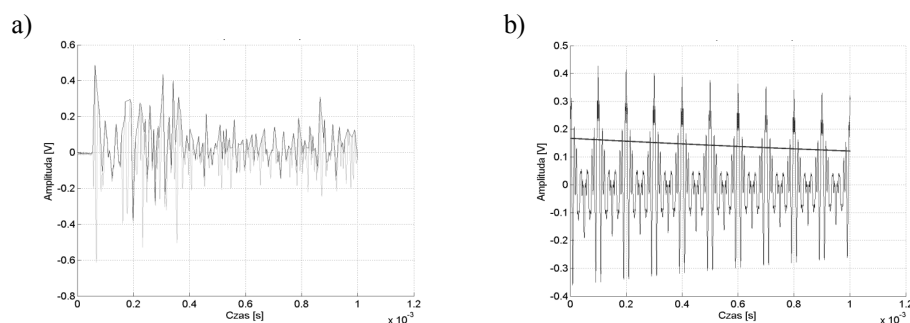
$$y_{SC}(t) = \sum_{i=1}^k \cos(2\pi f_i t) \quad \left. \vphantom{y_{SC}(t)} \right\} \text{Część druga} \quad (2)$$

$$y(t) = [y_{SE}(t)] * [y_{SC}(t)] = \frac{A_1}{1 + e^{-A_2(t-\mu_1)}} e^{-A_3(t-\mu_2)} \sum_{i=1}^j A_{\cos i} \cos(2\pi f_i t) \quad (3)$$

gdzie:  $y(t)$  – sygnał EA generowany przez WNZ,  $A_1$  – amplituda funkcji sigmoidalnej [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $A_2$  – współczynnik skali funkcji sigmoidalnej,  $A_3$  – współczynnik skali funkcji eksponentyjnej,  $\mu_1$  – współczynniki lokalizacji funkcji sigmoidalnej,  $\mu_2$  – współczynniki lokalizacji funkcji eksponentyjnej,  $A_{\cos i}$  – współczynniki

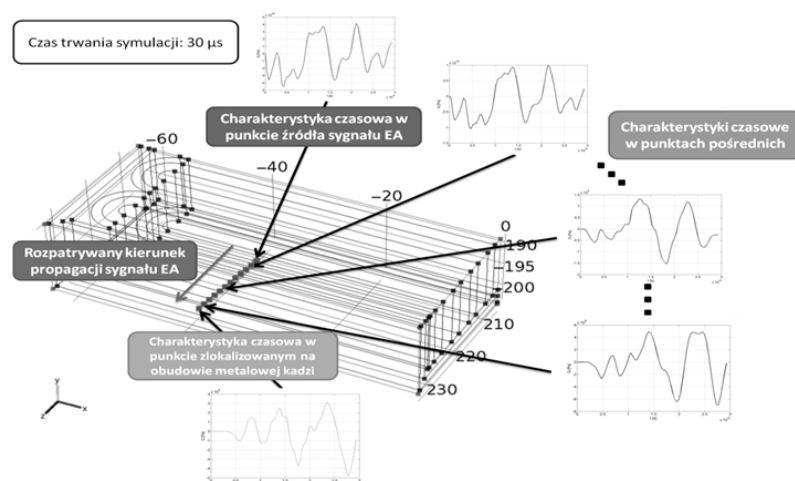


ki amplitudy kolejnych  $i$ -tych funkcji kosinusoidalnych,  $f$  – częstotliwość kolejnych  $i$ -tych funkcji kosinusoidalnych,  $f \in \{10, 20, 30, \dots 600\}$  kHz,  $k$  – liczba harmonicznych tworzących sygnał, dla modeli symulacyjnych przyjmowana była wartość  $k = 60$ ,  $t$  – zm. niezależna, czas [s].



Rys. 5 Przebiegi czasowe sygnału EA generowanych przez WNZ zarej. podczas pomiarów laboratoryjnych a), modelu mat. z estymowanymi parametrami b)

Do zamodelowania sygnału wykorzystano szereg kilkudziesięciu sygnałów (tzn. parametr  $k = 60$ ) o różnej wartości parametrów, estymując takie wielkości jak: częstotliwość i amplituda. Wartości poszczególnych współczynników równania (m.in.  $A_1, A_2, A_3, \mu_1$  i  $\mu_2$ ) uzyskano stosując autorskie oprogramowanie umożliwiające ich estymację. W ten sposób na podstawie wzorca sygnału EA generowanej przez WNZ (rys. 5a) z badań laboratoryjnych, uzyskano przebieg czasowy przedstawiony na rys. 5b.



Rys. 6. Widok modelu 3D i lokalizacje punktów tworzących analizowaną drogę propagacji sygnału EA generowanego z źródła sygnału

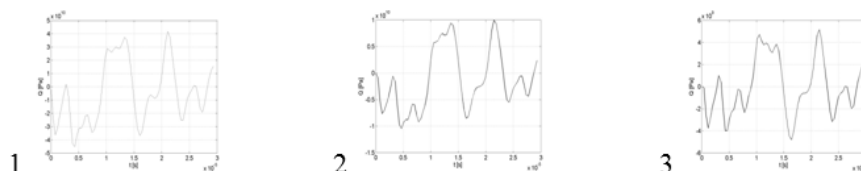
### 4.3. Droga propagacji sygnału EA

Sygnal wygenerowany w źródle, o określonych współrzędnych, rozchodzi się kulście we wszystkich kierunkach przechodząc przez wszystkie struktury modelu fizycznego. Do analizy określonej drogi propagacji, identycznej dla wszystkich przeprowadzonych symulacji, określono zestaw punktów, których współrzędne precyzyjnie określono. Punkty te definiują konkretny kierunek drogi propagacji sygnału EA generowanej przez WNZ.

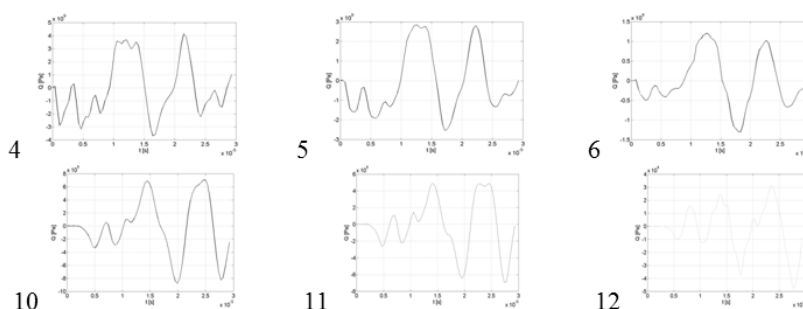
Na rys. 6 przedstawiono kierunek drogi propagacji i punkty jej analizy (od '1' do '12'). Otrzymano w ten sposób kilkanaście zestawów przebiegów sygnałów EA w konkretnych punktach modelu, co umożliwi obserwację wpływu struktury modelu na sygnał wyemitowany w punkcie umiejscowienia źródła.

## 5. ANALIZA SYMULACJI 3D ROZKŁADU CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO W MODELU NUMERYCZNYM

Dla prezentowanych wyników symulacji numerycznych analizowany czas rozchodzenia się fali EA wynosił 30  $\mu\text{s}$ . W symulacji wykorzystano estymowany model matematyczny sygnałów EA zgodnie z wzorcem pochodzącym z pomiarów laboratoryjnych.



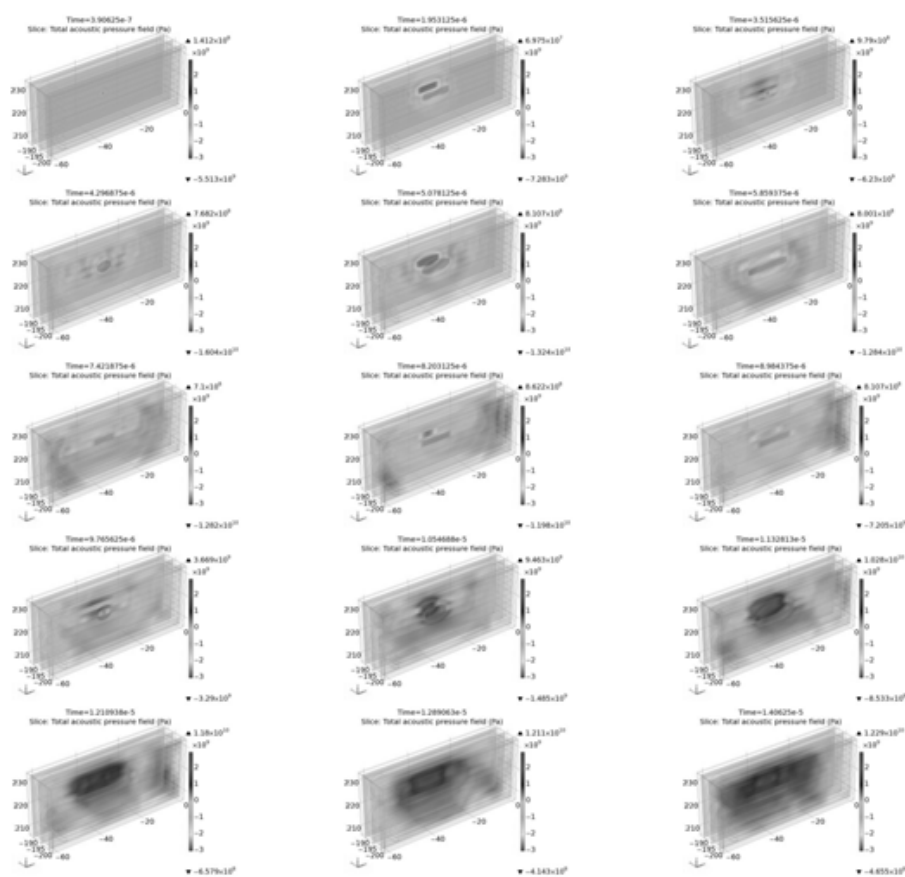
Rys. 7a. Charakterystyki czasowe ciśnienia akustycznego sygnałów EA w poszczególnych punktach modelu 3D



Rys. 7b. Charakterystyki czasowe ciśnienia akustycznego sygnałów EA w poszczególnych punktach modelu 3D

## 6. PODSUMOWANIE

Na przedstawionych charakterystykach czasowych (rys. 7) i mapach rozkładu ciśnienia akustycznego (rys. 8) zauważalne jest występowanie takich zjawisk jak: załamanie na granicy ośrodków, pochłanianie i odbicie fal EA rozchodzących się z miejsca generacji, tj. źródła (punkt 1). Wraz ze zmieniającym się ciśnieniem akustycznym w przestrzeni modelu, którego źródło zlokalizowano na granicy między dwoma zwijkami kondensatorowymi, obserwuje się rozwój czoła fali akustycznej. Zjawisko to widoczne jest przez zmianę wartości ciśnienia w określonych obszarach charakterystyk dla kolejnych momentów czasowych. Zmiany kształtu czoła fali są wywoływane przez otaczające źródło elementy drogi propagacji. W początkowych etapach symulacji są to zwijki kondensatorowe, które otaczają źródło.



Rys. 8. Mapy rozkładu ciśnienia akustycznego w wielowarstwowej strukturze modelu 3D kondensatora elektroenergetycznego, widok ZX dla trzech płaszczyzn w osi Y

Poszczególne elementy drogi propagacji wpływają na nowo powstałe zaburzenie ośrodka w punkcie źródła, ponieważ poprzez interferencję z falami odbitymi od ich granic wracają mając wpływ na dalszy charakter emitowanego sygnału. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi [13] zmienne czoło fali akustycznej jest propagowane po krawędziach zwijek i przemieszcza się zgodnie z ich kształtem. Część energii fali akustycznej wykorzystywana jest do pokonania granicy ośrodków w kierunku zgodnym z analizowanym kanałem akustycznym. Jednakże część energii jest pochłaniana przez impedancję akustyczną poszczególnych warstw. Do punktu pomiaru, znajdującego się na powierzchni stalowej obudowy, dochodzą fale akustyczne z bardzo wielu kierunków. Analizowany sygnał wypadkowy przyjmuje kształt będący sumą wypadkowych wszystkich fal dochodzących do tego punktu, co zostało zaobserwowane na wynikach większości przeprowadzonych symulacji. Sygnał w kanale akustycznym poprzedzającym punkt umieszczony na obudowie (zgodnie z przyjętym kierunkiem kanału akustycznego) wykazują wysoki poziom korelacji z sygnałem EA emitowanym ze źródła. Natomiast sygnał na powierzchni obudowy wykazuje poziomy korelacji tylko w określonych zakresach częstotliwości.

#### LITERATURA

- [1] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych dla potrzeb systemu eksperckiego, SiM, Of. Wyd. PO, Opole, 2009.
- [2] Menon R., Kolambekar S., Buch N.J., Ramamoorthy M., Correlation of acoustic emission method and electrical method for detection of partial discharges in transformer., Eindhoven: IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, pp. 299–302, 25–29.06.2001.
- [3] Sharkawy R.M., Fakhry S., Anis H., Ghazaly H.A., Particle detection in oil using acoustic and electrical based techniques in correlation with an inference method., Ottawa: Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1080–1085., 17–19.05.2005.
- [4] Gacek Z., Szadkowski M., Witos F., Malitowski G., Szerszeń G., Badanie wyładowań niezupełnych w olejowym transformatorze energetycznym zespoloną metodą elektryczno–akustyczną wspomaganą metodą chromatograficzną, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11b, 2010, s. 13–16.
- [5] Kapinos J., Uszkodzenia eksploatacyjne transformatorów energetycznych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 88/2010, 2010, ss. 201–207.
- [6] Massingue F., Meijer S., Agoris P.D., Smit J.J., Lopez–Roldan J., Partial Discharge Pattern Analysis of Modeled Insulation Defects in Transformer Insulation, Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, 2006, pp. 542–545.

- [7] Strachan S.M., Rudd S., McArthur S.D.J., Judd M.D., Meijer S., Gulski E., Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No 1, 2008, pp. 259–268.
- [8] Frącz P., Boczar T., Zmarzły D., Możliwości zastosowania spektrofotometrii optycznej w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych, Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 10, 2007, s. 36–41.
- [9] Witos F., Badanie wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną, SiM, Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2008.
- [10] Wotzka D., Mathematical Description of Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges, International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2012, pp. 617–620.
- [11] Wotzka D., Modelowanie sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wybrane klasy wyładowań niezupełnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2011.
- [12] Skubis J., Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, IPPT PAN, Of. Wyd. PO, Opole, 1998.
- [13] Skubis J., Zalewski J., Pomiary wyładowań niezupełnych w kondensatorach metodą akustyczną, IPPT PAN, konferencja: "Akustyczne i elektryczne metody badań.", Warszawa–Jabłonna, 1983, s. 266–278.

#### **THEORETICAL ANALYSIS OF ACOUSTIC PRESSURE PROPAGATE BY STRUCTURE OF POWER CAPACITOR PHYSICAL MODEL**

The article presents the results of theoretical analysis performed using computer simulations based on the finite element method. Analysis concern the propagation of acoustic waves emitted from a point source by the physical structure of the power capacitor. In the area of research was to determine the propagation path of the acoustic wave in the form of acoustic pressure at specific points of the model, emitted from a point source of acoustic waves with specified properties. Analyses of changes of sound pressure in the structure of the object simulated as well as in its surroundings. Based on the results obtained established analytical, acoustic spatial model of power capacitor.

*(Received: 29. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)*