

Krzysztof POLAKOWSKI  
Jan SIKORA  
Stefan F. FILIPOWICZ

## WPŁYW PROTOKÓŁÓW POMIAROWYCH NA DOKŁADNOŚĆ OBRAZOWANIA STANU ZAWILGOCENIA ŚCIAN METODĄ TOMOGRAFII ULTRADŹWIĘKOWEJ

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono zastosowanie tomografii ultradźwiękowej do tworzenia obrazów zawilgocenia murów w ich przekrojach poprzecznych. Do pomiaru średniej wartości prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej w murze zaproponowano tomograf ultradźwiękowy.*

*Zaproponowana metoda umożliwia obrazowanie profilu zawilgocenia muru w całym przekroju poprzecznym. Idea ta może stanowić istotę działania ultradźwiękowej tomografii wielościeżkowej do badania stanu zawilgocenia murów.*

*Do tworzenia obrazów tomograficznych zastosowano liniowe zadanie najmniejszych kwadratów. Zastosowana metoda została zilustrowana wynikami uzyskanymi z numerycznych symulacji.*

**Słowa kluczowe:** *tomografia ultradźwiękowa, badanie zawilgocenia murów, protokoły pomiarowe, obrazowanie tomograficzne*

---

**dr inż. Krzysztof POLAKOWSKI**  
e-mail: [kp@zkue.ime.pw.edu.pl](mailto:kp@zkue.ime.pw.edu.pl)

**prof. dr hab. inż. Jan SIKORA**  
e-mail: [sik@iem.pw.edu.pl](mailto:sik@iem.pw.edu.pl)

**dr hab. inż. Stefan F. FILIPOWICZ**  
e-mail: [2xf@nov.iem.pw.edu.pl](mailto:2xf@nov.iem.pw.edu.pl)

Politechnika Warszawska,  
Wydział Elektryczny

## 1. WSTĘP

Brak izolacji poziomej w budynkach niepodpiwniczonych oraz brak izolacji, zarówno poziomej, jak i pionowej w budynkach podpiwniczonych powoduje zawilgocenie murów, najczęściej do około 2 metrów nad poziom gruntu (maksymalnie do 6 metrów). Prawidłowa ocena zaistniałej sytuacji ma istotny wpływ na przeprowadzenie prac eliminujących niekorzystne procesy powodujące degradację murów budynków. Niestety brak jest w miarę prostych metod nieinwazyjnych umożliwiających taką ocenę.

Jednym z bardziej obiecujących nieniszczących sposobów badania jakości murów może być wykorzystanie ultradźwięków do wykrywania tego typu defektów w całej ich objętości. Badany obiekt oddziałuje na falę ultradźwiękową, ograniczając jej prędkość rozchodzenia się oraz absorpcję i rozpraszanie (tłumienie fali). Na podstawie zarejestrowanych sygnałów otrzymuje się informację o własnościach lepko-sprężystych oraz niejednorodnościach ośrodka.

a)



b)



**Rys. 1. Zawilgocenie ścian budynków [1]:** a) wizualizacja procesu zawilgocenia ściany, b) uszkodzenia ściany spowodowane zawilgoceniem

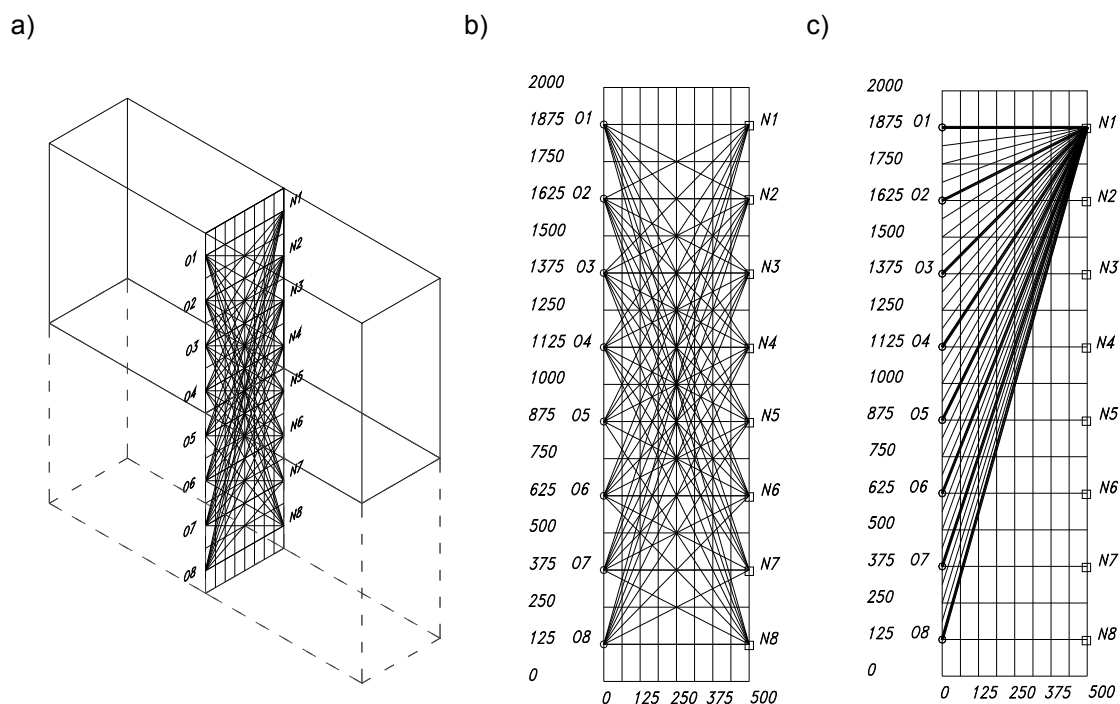
Ultradźwiękowa defektoskopia obejmować może zarówno makro-niejednorodności występujące w murach w postaci nieciągłości typu pęknięć, rozwarstwień, pęcherzy lub obecności ciał obcych, jak i mikro-niejednorodności,

czyli mikroskopowych odchylenia od jednorodnej struktury takich jak odchylenia od wymaganych właściwości materiałów powodowanych na przykład zawilgoceniem [15].

## 2. PROTOKÓŁ POMIAROWY

Istotnym zagadnieniem w uzyskaniu prawidłowych wyników w badaniach tomograficznych jest prawidłowe określenie protokołu pomiarowego.

Do badań przyjęto przekrój poprzeczny muru o wymiarach 2 x 0.5 m, na którym początkowo umieszczono równomiernie po 8 nadajników i odbiorników (rys. 2).



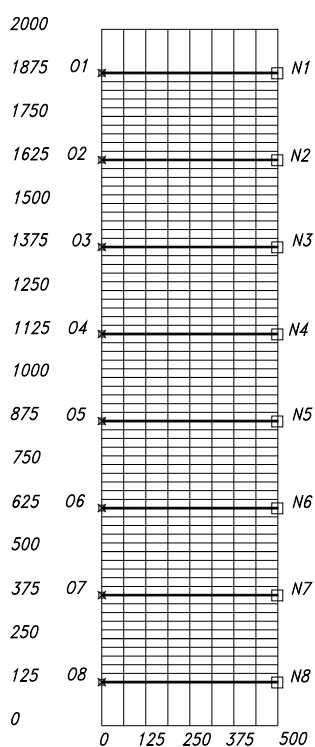
**Rys. 2. Badany obszar:** a) widok aksonometryczny b) obszar pomiarowy c) promienie główne (linie grubsze) między nadajnikiem N1 i wszystkimi odbiornikami O1–O8 oraz promienie pomocnicze uwzględniane w zagęszczaniu obszaru obliczeń

W celu poprawy dokładności obliczeń zwiększono do 16 liczbę nadajników i 16 odbiorników oraz zmieniono ich rozmieszczenie tak, aby objąć obliczeniami poziom o zerowej wysokości. Do eksperymentu przyjęto istnienie w murze obszaru zawilgocenia w postaci ustawionego niesymetrycznie wzglę-

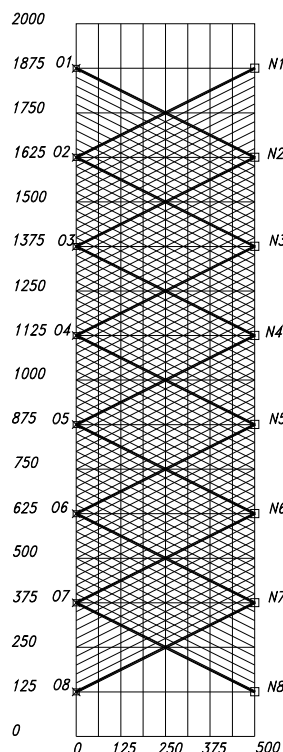
dem ścian obszaru prostokątnego (obszar bardziej suchy wewnątrz i bardziej zawilgocony na zewnątrz budynku), jak pokazano to na rys. 3. Zwiększono również rozdzielczość obszaru pomiarowego do 976 pikseli (rys. 4). Ponieważ powstał niedookreślony układ równań, do dalszych obliczeń zwiększono liczbę promieni do 1216 generując promienie pomocnicze, jak pokazano to na rys. 2c.

Przeprowadzono również obliczenia, w których do badań wzięto wybrane grupy ścieżek pomiarowych ustawionych równoległe do siebie, jak pokazano to na rys. 3.

a)



b)



**Rys. 3. Wybrane do obliczeń wiązki promieni ustawionych równoległe do siebie:**

a) między nadajnikami i przeciwległymi odbiornikami b) między nadajnikami i przesuniętymi o jeden (w odniesieniu do przeciwległych) odbiornikami

### 3. TECHNICZNE MOŻLIWOŚCI REALIZACJI

Ultradźwiękowa tomografia transmisyjna jest metodą, która umożliwia konstruowanie obrazu struktury wewnętrznej obiektu, jego kształtu, rozmiarów i położenia, dzięki wykorzystaniu informacji zawartej w impulsach ultradźwięko-

wych przenikających przez badany z wielu kierunków obszar. Przyjęta metoda pomiarów stanowi podstawę działania ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej. Podstawą systemu pomiarowego jest wieloscieżkowość (wielokanałowość) badań. Należy zastosować wiele przetworników nadawczych i odbiorczych, aby jak najdokładniej określić własności wybranego obszaru. Użycie większej ilości przetworników umożliwia wszechstronny skanowanie a także daje możliwość określenia dokładności i rozdzielczości przestrzenno–czasowej, z jaką będzie dokonywana analiza obszaru.

Obraz tomograficzny powstaje na podstawie prędkości rozchodzenia się oraz współczynnika tłumienia impulsowej fali ultradźwiękowej. Wielkości te mierzone są lokalnie, a od ich zróżnicowania zależy kontrast obrazu. Przez lokalny pomiar prędkości, w tomografii ultradźwiękowej określa się pomiar czasów przejścia impulsu między nadajnikiem i odbiornikiem, a różnice absorpcji przez pomiar zmiany amplitudy [15]. Pomiar taki wymaga zebrania możliwie dużej ilości danych z przetworników, z zachowaniem precyzyjnych informacji o rozkładzie amplitud i faz. Należy zadbać, aby układy pomiarowe nie wywierały wpływu na badany obiekt. Dlatego aparatura musi spełniać określone wymagania konstrukcyjne, głównie dotyczące biernego zastosowania ultradźwięków.

Obraz tomograficzny otrzymuje się na podstawie pomiarów (wartości średnich) uzyskanych w projekcjach, wykorzystując algorytmy rekonstrukcyjne bazujące na transformacie Radona [5]. Z tego powodu geometria pomiarów tomograficznych odgrywa ważną rolę podczas rekonstrukcji obiektu. W tomografii ultradźwiękowej rozróżnia się geometrię rzutów równoległo – promieniowych oraz rzutów rozbieżnych. W przypadku geometrii rozbieżnej wymagane jest stosowanie dużej liczby przetworników nadawczo odbiorczych fal ultradźwiękowych. W geometrii rzutów równoległych, wyniki uzyskuje się w trakcie przesuwania oraz obrotu głowic w pobliżu badanego obiektu. Niezależnie od rodzaju geometrii, pomiary dokonywane są wzdłuż prostych łączących nadajnik i odbiornik. Geometria rzutów wynika ze sposobu umiejscowienia nadajników i odbiorników względem obiektu.

## **4. EKSPERYMENT NUMERYCZNY**

---

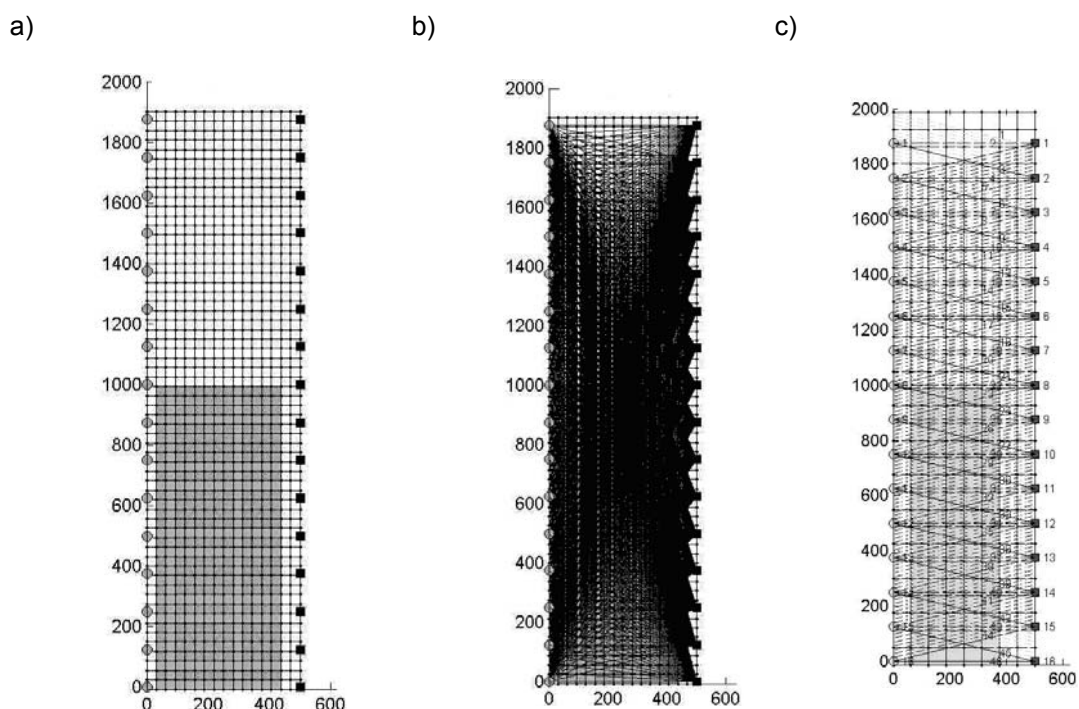
Eksperyment numeryczny został przeprowadzony na nie zawierających szumów danych syntetycznych. Algorytm konstrukcji obrazu został zaprojektowany w ten sposób, aby można było wygenerować nadokreślony układ równań, (dla którego liczba równań jest większa niż liczba niewiadomych [11]).

Niestety immanentną cechą tomografii jest między innymi i to, że macierz współczynników jest macierzą prostokątną o niepełnym pseudo – rzędzie. Zatem konieczne jest rozpatrzenie rozwiązań próbnych (ang. *candidate solutions*) [10] oraz wybór jednego z nich.

Jako kryterium wyboru pseudo – rzędu macierzy, a zatem i rozwiązania próbnego, przyjęto rozwiązanie o możliwie małej normie, gwarantujące możliwie minimalną normę wektora residualnego.

Na rysunku 4 przedstawiono przekrój poprzeczny badanego obszaru muru gdzie na jednej ścianie rozmieszczono 16 nadajników (kwadraciki) oraz na drugiej 16 odbiorników (kółeczka). Obszar zacieniony w postaci dużego prostokąta oznacza zawilgocenie.

Wybrane obrazy eksperymentu numerycznego przedstawiono na rys. 5b, 6b, 7a, 9 i 10b. Na rysunkach 5c, 6c i 7c przedstawiono odpowiadające im wykresy rozkładu wartości osobiwych  $a$  na rys. 7b i 8b przedstawiono obrazy macierzy współczynników rozwiązywanego układu równań.



**Rys. 4. Obszar pomiarowy muru przyjęty do obliczeń:** a) widok obszaru pomiarowego bez ścieżek pomiarowych, b) wszystkie główne ścieżki pomiarowe (promienie), c) wybrane równoległe ścieżki pomiarowe

Przedstawione na poniższych rysunkach obrazy tomograficzne (odzworowujące modelowane obszary pomiarowe) pokazują, jak duży wpływ na wyniki

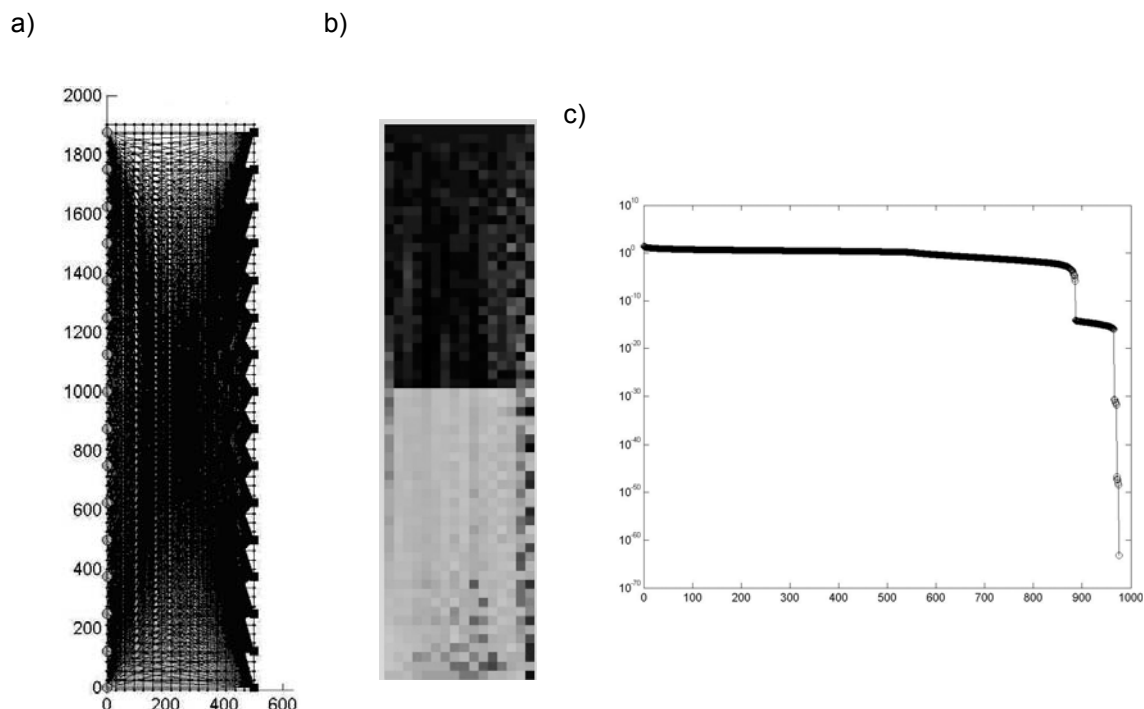
ma prawidłowo dobrany protokół pomiarowy. Szczególnie wyraźnie widać to na rys. 6b i 7a, w których odwzorowywano tak samo modelowany obszar zawilgocenia. Przyjęcie w protokóle pomiarowym do obliczeń danych tylko z dwóch grup ścieżek pomiarowych ustawionych do siebie równoległe znacznie pogorszyło obraz tomograficzny modelowanego obszaru (rys. 7a).

Obrazy tomograficzne uzyskiwane z rozwiązania nadokreślonego układu równań, uzyskiwanego poprzez zagęszczenie promieni, dokładniej odwzorowały modelowane obszary (zgodnie z przewidywaniami) (rys. 6b, 9b i 10b).

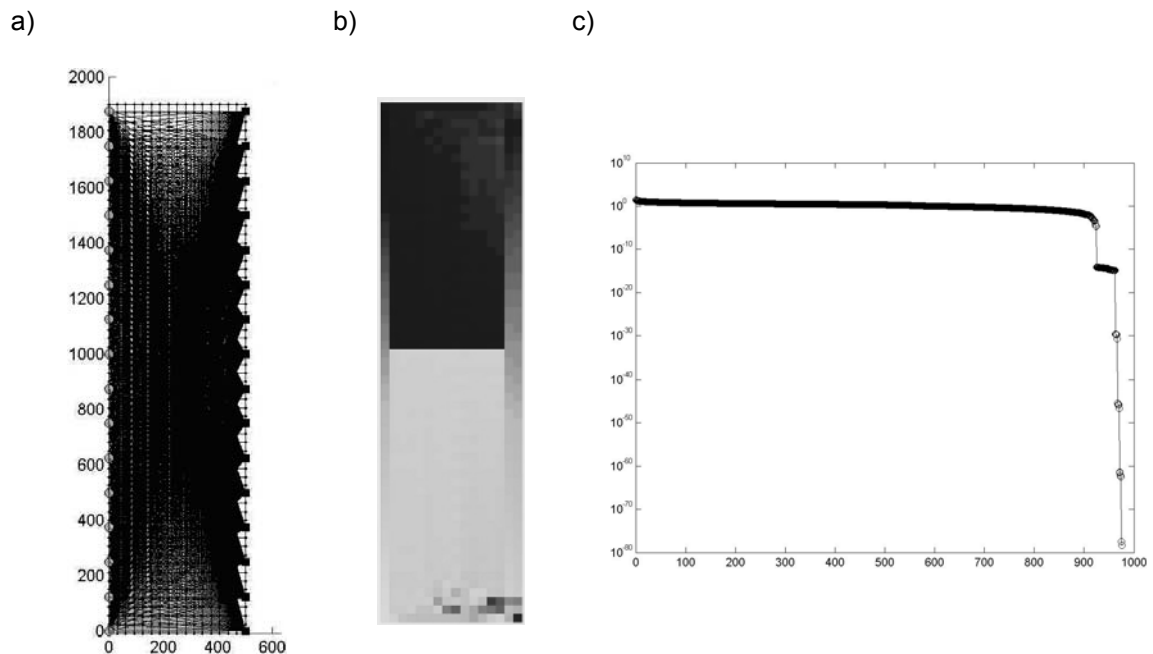
Nieprecyzyjne odwzorowanie na obrazie tomograficznym badanego obszaru (rys. 7a) wynika z faktu, że w przypadku tego protokołu pomiarowego uzyskano niewielką liczbę istotnych wartości osobliwych (rys. 7c).

Wyniki uzyskane z obliczeń pokazują, że nadokreślony układ równań (z większą liczbą promieni = 1216) daje lepsze rezultaty, co widać na rys. 9b.

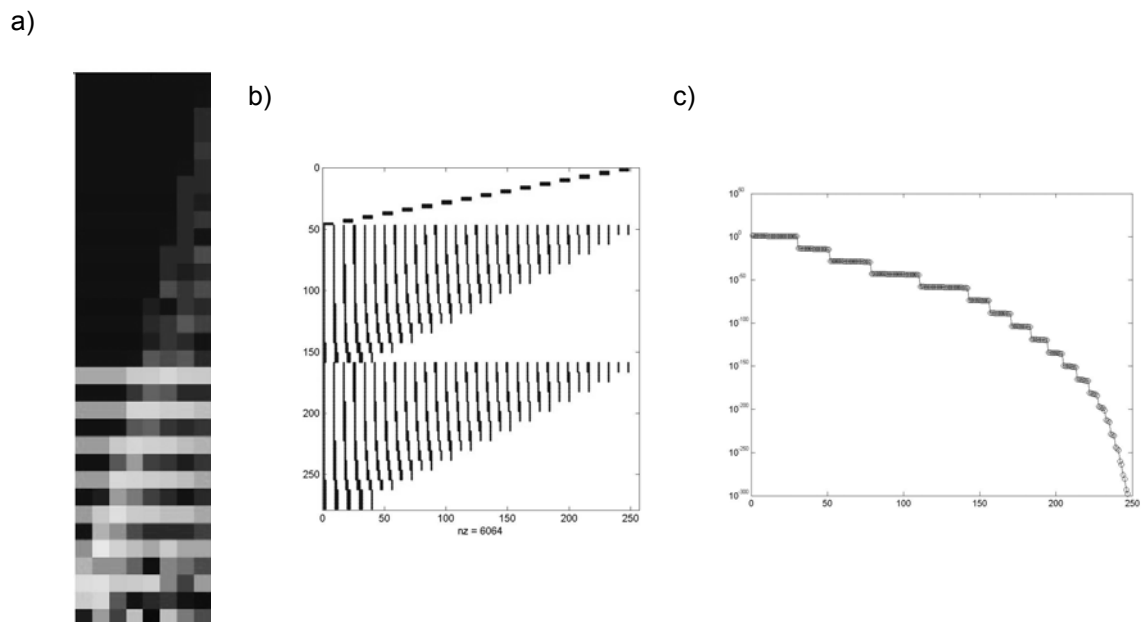
Wyniki badań symulacyjnych przedstawione na rys. 8b pokazują, że zaproponowana metoda daje możliwość dokładnego odwzorowania nawet bardzo skomplikowanych geometrycznie obszarów.



**Rys. 5. Modelowe obliczenia zawilgoconego obszaru pomiarowego z kwadratowym układem równań (zagęszczenie promieni równe liczbie pikseli = 976): a) widok obszaru pomiarowego ze ścieżkami pomiarowymi, b) uzyskany obraz tomograficzny, c) wykres rozkładu wartości osobliwych**

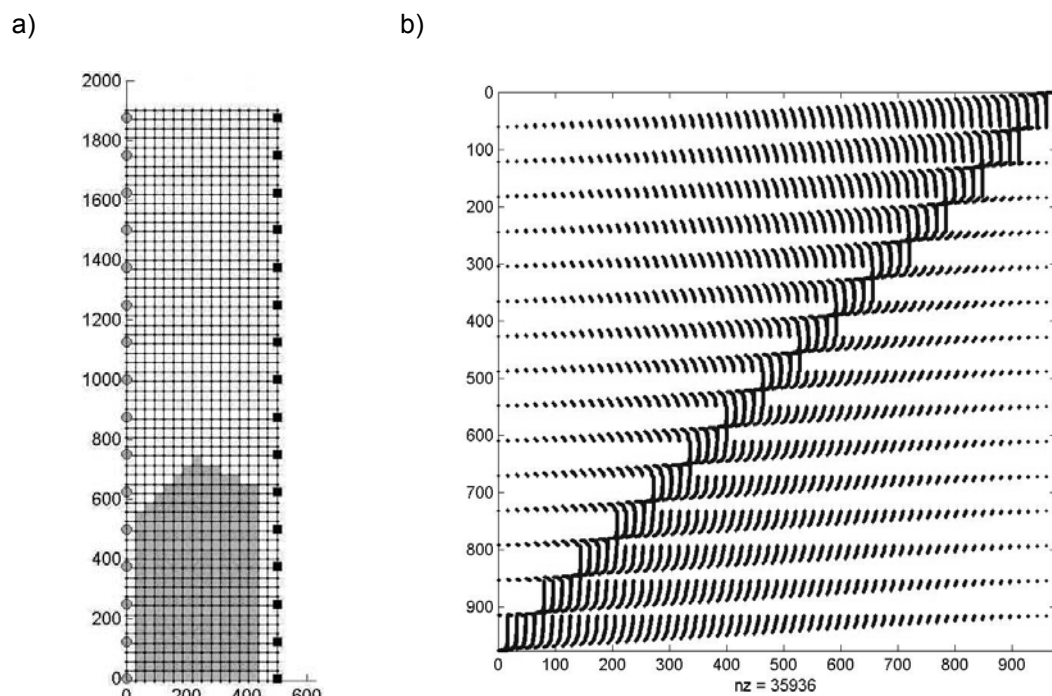


**Rys. 6. Modelowe obliczenia zawilgoconego obszaru pomiarowego z nadookreślonym układem równań (zagęszczenie promieni 1216): a) widok obszaru pomiarowego ze ścieżkami pomiarowymi, b) uzyskany obraz tomograficzny, c) wykres rozkładu wartości osobliwych**

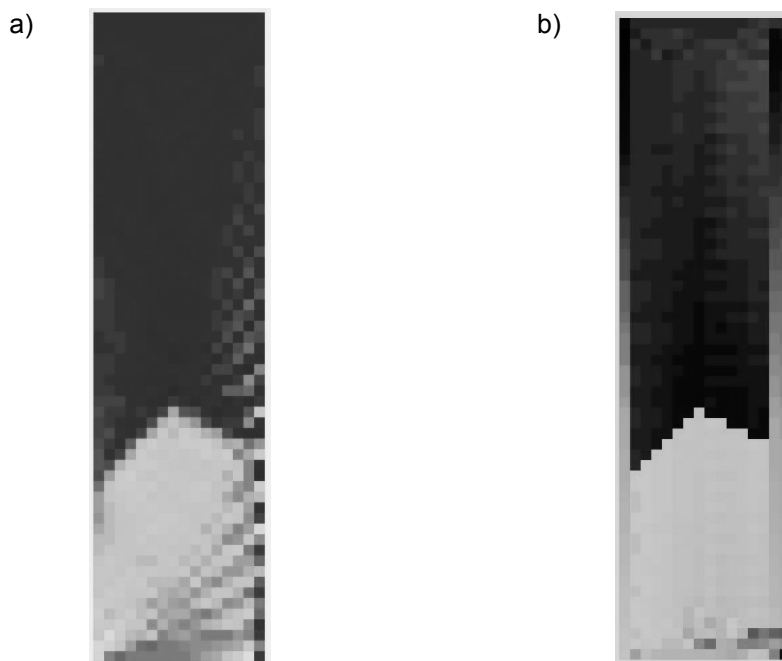


**Rys. 7. Modelowe obliczenia zawilgoconego obszaru pomiarowego z układem promieni ustawionych równolegle: a) Uzyskany obraz tomograficzny, b) obraz macierzy współczynników rozwiązywanego układu równań, c) wykres rozkładu wartości osobliwych**

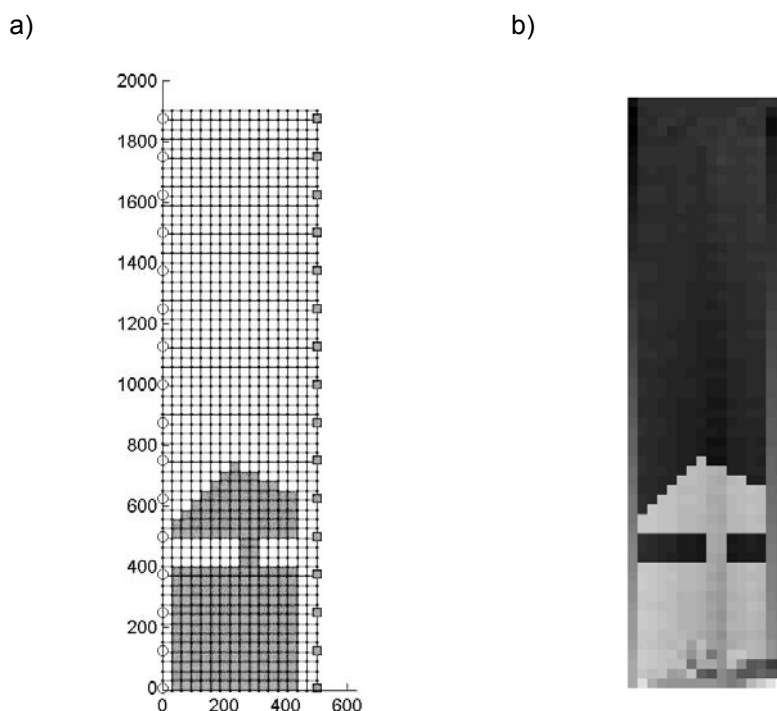




**Rys. 8. Symulacja zbliżonego do przewidywań zawilgoconego obszaru pomiarowego:**  
 a) przyjęty do obliczeń obszar symulujący proces mikrofalowego suszenia ścian od strony wewnętrznej i zewnętrznej badanego muru, b) obraz macierzy współczynników rozwiązywanego układu równań



**Rys. 9. Wyniki modelowych obliczeń zawilgoconego obszaru pomiarowego z rys. 6a:**  
 a) obraz tomograficzny modelowanego obszaru dla macierzy 976x976 i 886 wartości osobliwych, b) obraz tomograficzny modelowanego obszaru dla macierzy 1216x976 i 886 wartości osobliwych



**Rys. 10. Modelowe obliczenia zawilgoconego obszaru z dwustronnym przesuszeniem:** a) widok obszaru pomiarowego przyjętego do obliczeń, b) uzyskany obraz (zagęszczenie promieni 1216)

## 5. WNIOSKI

Uzyskane wyniki wskazują wyraźny wpływ prawidłowego doboru protokołu pomiarowego na uzyskiwane wyniki.

Przedstawione w tym opracowaniu badania wykazują, że zwiększając liczbę ścieżek pomiarowych (promieni) zwiększa się rozmiar wektora kolumnowego  $s$  oraz liczbę wierszy macierzy współczynników  $W$  z równania  $Wf = s$ . Daje to lepsze rozwiązanie (lepsze odwzorowanie analizowanego obszaru) przy jednoczesnym wydłużeniu czasu obliczeń. Zwiększając z kolei rozmiar siatki (zwiększanie ilości pikseli) powiększana jest liczba kolumn macierzy współczynników  $W$ , a więc  $i$  i niedookreśloność tej macierzy. Należy więc jednocześnie w sposób proporcjonalny zwiększać rozmiar siatki oraz liczbę stosowanych promieni. Zwiększanie rozdzielczości siatki jest wskazane, ponieważ powoduje, że odwzorowywany obiekt posiada więcej szczegółów i jest bardziej zbliżony do obiektu wzorcowego (rys. 5b, 7b i 8b).

Uzyskane wyniki są surowym obrazem odwzorowań tomograficznych dla danych syntetycznych. Również w przedstawionym eksperymencie numerycz-

nym nie zastosowano żadnej metody regularyzacyjnej. Mimo to uzyskane zaproponowaną metodą obrazy odwzorowują modelowane obszary oraz umożliwiają ich prawidłową lokalizację wewnątrz badanego obiektu. Potwierdza to, że zaproponowana metoda jest skuteczna i efektywna przy tworzeniu obrazów tomograficznych w przypadku monitorowania stanu zawilgocenia ścian budynków.

Przewidywana jest weryfikacja doświadczalna uzyskanych wyników poprzez wykonanie w warunkach laboratoryjnych serii odwzorowujących warunki rzeczywiste testów na murach poddawanych procesom nawilgacania i osuszania.

## LITERATURA

1. Berowski P., Filipowicz S. F., Wojtowicz S.: Determining location of moisture area of the wall by 3D Electrical Impedance Tomography, 4<sup>th</sup> World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japonia, 5–8 september 2005, pp. 214–219
2. Gudra T.: Właściwości i zastosowanie przetworników ultradźwiękowych do pracy w ośrodkach gazowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
3. Guziak T., Kamińska A., Pańczyk B., Sikora J.: Metody numeryczne w elektrotechnice, Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, Lublin 2002.
4. Jagodziński Z.: Przetworniki ultradźwiękowe, WKŁ, Warszawa, 1997.
5. Kak A. C., Slaney M.: Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, 1999.
6. Kaczorowski P., Kazmierczak J. K.: Tomograficzne przepływomierze ultradźwiękowe. Praca dyplomowa magisterska, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, Październik 2006.
7. Lawson C. L., Hanson R. J.: Solving Least Squares Problems, Classics in Applied Mathematics 15, SIAM 1995.
8. Mosorov V., Sankowski D., Mazurkiewicz Ł., Dyakowski T., The 'best – correlated pixels' method for solid mass flow measurements using electrical capacitance tomography, Measurement Science and Technology, 13, pp. 1810–1814, 2002.
9. Opielński K.: Analiza możliwości zobrazowania struktury wewnętrznej obiektów metodą ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej. Praca doktorska, Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
10. Polakowski K., Sikora J., Filipowicz S. F.: Linear Least Squares Problem for Image Forming of Multipath Ultrasound Tomography, 7th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Odessa, Ukraina, August 28–30, 2006, pp. 5–9
11. Polakowski K., Sikora J., Filipowicz S. F.: Ultrasound Tomography Imaging based on linear Least Squares Problem, 4rd International Symposium on Process Tomography In Poland, Warszawa, Sep. 14–15 2006, pp. 79–84
12. Polakowski K., Sikora J., Kaczorowski P., Kazmierczak J., Filipowicz S. F.: Liniowe zadanie najmniejszych kwadratów w konstrukcji obrazów wielościeżkowej tomografii ultradźwiękowej, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXXII 10/2006, pp. 18–24

13. Rabelais R. A., Smis L.: Ultrasonic Flow Measurement: Technology and Applications in Process and Multiple Vent Stream Situations, Proceedings of the Texas A&M Symposium 2002.
14. Sikora J.: Numeryczne algorytmy w tomografii impedancyjnej i wiroprowadowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 2000.
15. Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowania, WNT, Warszawa 1993.

*Rękopis dostarczono, dnia 20.02.2007 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. inż. Antoni Cieśla**

## AN APPLICATION OF THE ULTRASOUND TOMOGRAPHY IN IMAGING A STATE OF THE WALLS HUMIDIFICATION

Krzysztof POLAKOWSKI  
Jan SIKORA  
Stefan F. FILIPOWICZ

**ABSTRACT** *Application of the ultrasound tomography for imaging a state of the wall humidification is presented in this paper. The ultrasound tomography is proposed for measure the average value of the ultrasound wave speed flowing through the wall.*

*The ultrasonic measurements are one of the most promising. The main advantage of this method is the fact that it is based on contactless, non-invasive measurement which does not cause any physics-chemical changes in observed environment. It also enables measurement independently from temperature, pressure and density of measured medium. Ultrasound sets of emitters and receivers are characterized by high sensitivity, they do not contain any movable parts which have a contact with measured medium, they are easy to install and are relatively cheap. In analyzed system the transmitters one by one generates ultrasound impulses, which with different delays reach all receivers.*

*Assumption of the ultrasonic measurements is reasonable with the following respects:*

- 1. Ultrasounds spread out in straight lines, so we have not to make such simplifying assumption like in impedance or capacitance tomography.*
- 2. Suggested method is relatively simple and enables imagining in real time.*
- 3. Accuracy in case of velocity profile imagining is not a critical case. Image of velocity profile construction in a plane of receivers means estimation of unknown values set, which we can denote as  $f(x,y)$ .*

*Proposed method enable visualisation a humidification in a cross section of the wall. The idea can directly lead to a multipath ultrasonic tomography for the monitoring a humidification of the walls. Multipath systems with different sets of emitters and receivers are used in order to enlarge the accuracy of measurement.*

*The image construction was done with an aid of linear least squares problem. Proposed method was illustrated with a numerical simulation results.*