

dr hab. inż. Robert Wójcik, prof. UWM^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3142-7969

dr inż. Piotr Kosiński¹⁾

ORCID: 0000-0003-4850-9909

mgr inż. Joanna Misiewicz^{1*)}

ORCID: 0000-0003-0613-0167

Monitoring zawartości wilgoci w murach ceglanych metodą rezystancyjną – dobór skali kalibracji czujników

Moisture content monitoring of brick walls using the resistive method – selection of the sensors calibration scale

DOI: 10.15199/33.2023.03.09

Streszczenie. Na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie opracowano sondy impedancyjne przeznaczone do długoterminowego monitorowania zawartości wilgoci w murach ceglanych [1]. Jak wszystkie pomiary pośrednie, wykorzystanie przepływu prądu elektrycznego wymaga przeprowadzenia procedur skalowania urządzeń pomiarowych [2, 3, 4, 5, 6]. W artykule omówiono istotny problem, jakim jest dobór optymalnej wielkości wzorców wilgoci wykorzystywanych do kalibracji. Stwierdzono, że przepływy sygnałów prądowych wysyłane podczas pomiarów jednorazowych i cyklicznie powtarzane w ramach monitoringu zmieniają właściwości fizyczne kapilarno-porowatej struktury muru. Ustalono zasięg występowania interakcji sygnału elektrycznego z wilgotną strukturą badanego materiału. Określono minimalną wielkość wzorców przy jednoczesnym uwzględnieniu reprezentatywności wielomateriałowych struktur murowych. Ustalono również inne czynniki wpływające na dokładność kalibracji.

Słowa kluczowe: badanie wilgotności; czujnik wilgotności; wilgotność muru; pomiary rezystancji elektrycznej.

Abstract. At the University of Warmia and Mazury in Olsztyn there have been developed impedance sensors for long-term monitoring of moisture content in brick walls [1] in response to this demand. Similarly, as with all indirect moisture content measurements, the use of the electric current flow, also requires carrying out procedures for scaling measuring devices [2, 3, 4, 5, 6]. The article discusses the selection of the optimal size of moisture standards, what is undoubtedly an important problem of calibration procedures. It was found that the current signal flows, sent both during single measurements and cyclically repeated as part of monitoring, change the physical properties of capillary porous structure of the walls. The range of interaction of the electrical signal with the wet structure of the tested material was determined. The minimum size of the standards was specified, basing the representativeness of multi-material structures. Other factors affecting calibration accuracy have also been established.

Keywords: humidity investigation; moisture content sensors; wall humidity; electrical resistance measurements.

W ramach prowadzonej oceny stanu wilgotnościowego obiektów budowlanych cennych informacji o obiekcie mogłoby dostarczać ciągłe monitorowanie murów. W praktyce stosowane są głównie mało dokładne pomiary elektryczne obejmujące strefy przypowierzchniowe. Sporadycznie stosowane są również metody elektryczne przeznaczone do pomiarów wgłębnych [7, 8]. Do tego celu wykorzystuje się czujniki wprowadzane do otworów wiertniczych. Działają one na zasadzie pomiaru wilgotności powietrza w wydzielonej objętości materiału lub, jak w metodzie TDR, czujniki umieszcza

się w zaprawie zapewniającej kontakt hydrauliczny z badanym materiałem [6, 9]. Odwarty zaburzają częściowo istniejące w murze gradienty wilgoci i ciepła, ale ograniczona do cienkiego otworu inwazyjność jest nieunikniona. Do tego typu pomiarów są stosowane przede wszystkim **czujniki pojemnościowe**, które ze względu na wysoką częstotliwość wykorzystywanych sygnałów wymagają ekranowania i stosunkowo krótkich przewodów pomiarowych. Dostępne są również urządzenia bezprzewodowe. W obiektach zabytkowych nie są jednak akceptowane ze względu na duże gabaryty i związaną z tym konieczność zwiększenia średnicy otworów wiertniczych.

Duży potencjał wdrożeniowy mają systemy wykorzystujące czujniki rezystancyjne. Istotną ich zaletą jest moż-

liwość użycia cieńszych i znacznie dłuższych przewodów pomiarowych bez konieczności ekranowania. Ułatwia to lokalizację central zbierających i przesyłających dane pomiarowe do odbiorcy. Koszt układów pomiarowych i wytworzenia czujników rezystancyjnych jest również mniejszy niż rozwiązań pojemnościowych. Przy najczęściej jednorazowym wykorzystaniu czujników, cena jest istotnym argumentem decydującym o ich wyborze. Podatność tego rozwiązania na miniaturyzację sprawia, że średnica wykonywanych otworów wiertniczych jest względnie mała. Czujniki opracowane w ramach badań [1] mają średnicę 10 mm. Dzięki temu mieszczą się do głębokości nawet 90 cm w otworach wiertniczych wykonanych w spoinach muru za pomocą dostępnych w handlu wiertel o średnicy 12 mm.

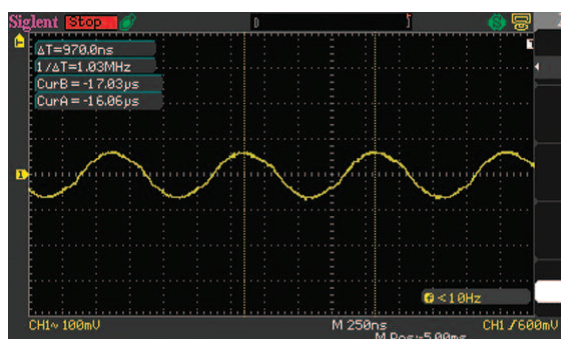
¹⁾ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Geoinżynierii

^{*)} Adres do korespondencji: robert.wojcik@uwm.edu.pl; joanna.misiewicz@uwm.edu.pl

Zasada działania czujników rezystancyjnych

Pomiary „rezystancyjne” to umowna nazwa zespołu czynności wykonywanych w celu ustalenia zawartości wilgoci, wykorzystujących wpływ obecności elektrolitów na relacje między napięciem a natężeniem sygnału elektrycznego przepływającego między elektrodami umieszczonymi w badanym materiale. Dotychczas, z zastosowaniem sygnałów elektrycznych o zmiennym przebiegu, pomiar rezystancji odnosił się do części rzeczywistej impedancji zespolonej. Obecnie pomiar sygnału elektrycznego na potrzeby oznaczenia zawartości wilgoci jest rozszerzony. Mikroprocesorowe układy pomiarowe analizują również wpływ zawilgocenia na zmianę przebiegu wysyłanych kolejno sygnałów w czasie. Zastosowanie prądu okresowo zmiennego zabezpiecza kapilarno-porowaty ośrodek przed nadmierną polaryzacją. Całkowite wyeliminowanie zjawiska polaryzacji nie jest jednak możliwe. Przeprowadzone przez nas badania wykazały, że każdy z testowanych mierników pozostawiał w badanej strukturze „elektryczny ślad” w postaci spolaryzowanego pola. Zaburzenia pola utrzymywały się niekiedy nawet przez kilkanaście godzin po zaniku sygnału pomiarowego. Najczęściej stosowane są sygnały elektryczne, których wartości chwilowe natężenia prądu przemiennego przyjmują naprzemiennie wartości dodatnie i ujemne (rysunek 1). Obecnie w zaawansowanych technologicznie miernikach wartość średnia całookresowa, czyli składowa stała sygnału nie wynosi zero.

Urządzenia służące do pomiaru wilgotności materiałów są wyposażane w tzw. tryb indeksowy. Z wykorzysta-



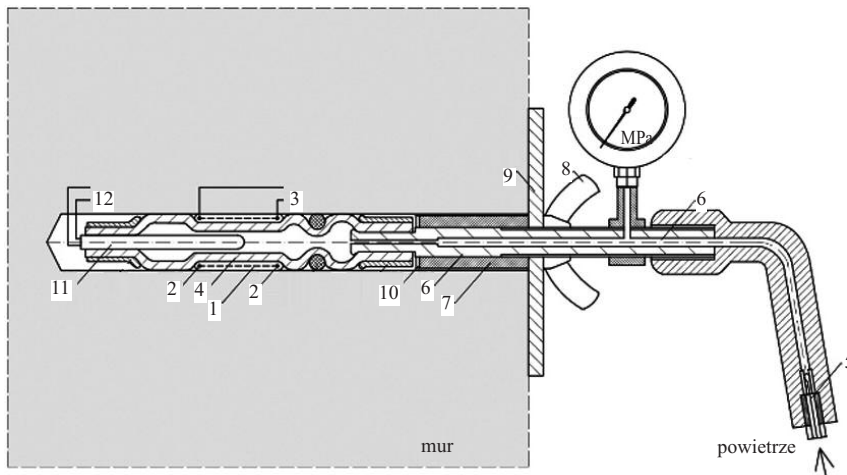
Rys. 1. Sinusoidalny przebieg sygnału pomiarowego
Fig. 1. Sinusoidal waveform of the measurement signal

niem tej funkcji badanie polega na automatycznym przypisaniu określonej wartości odpowiedzi sygnału elektrycznego konkretnej liczbie bezwymiarowej w skali np. 1 – 1000. Na podstawie przeprowadzonej kalibracji wartości indeksowej można określić zawartość wilgoci w materiale. W przypadku analizowania jedynie zachodzących w murze trendów zmiany zawartości wilgoci można posługiwać się trybem indeksowym – bez konieczności przeprowadzania pracochłonnej kalibracji.

Podstawowym elementem systemu pomiarowego jest czujnik, od którego w dużej mierze zależy czułość definiowana jako stabilny w czasie iloraz przyrostu odpowiedzi przyrządu pomiarowego przez odpowiadający mu przyrost sygnału wejściowego. Opracowane czujniki rezystancyjne przedstawiono na rysunku 2. Jedną z wykonanych sond składa się z odpowiednio ukształtowanego sorbentu (1) pełniącego również funkcję stabilizatora położenia elektrod pomiarowych (2). Elektrody są połączo-

niu nadciśnienia zapewnia stabilny kontakt pograżonych w sorbencie elektrod z poboczną otworu. Stabilizację całego zestawu w otworze osiąga się dzięki silikonowej tulei (7), sprężanej za pomocą nakrętki motylkowej (8), płytki oporowej (9) i podkładki (10). Opracowano również inne, tańsze i łatwiejsze w obsłudze mechanizmy dociskające elektrody do pobocznic otworu. Zasada działania tych sond jest analogiczna. Czujnik temperatury (11) wykonano z termistora połączonego przewodami pomiarowymi (12) z rejestratorem.

Za zmieniającym się potencjałem wilgoci w murze podąża potencjał sorbentu mierzony impedancją prądu elektrycznego. Poza budową czujnika na dokładność pomiarów główny wpływ mają właściwości fizykochemiczne badanego obiektu [3, 4, 7]. Równie ważne są czynniki metrologiczne, stabilność kontaktu sorbentu z materiałem i wiele innych. W przypadku każdej metody pośredniej, w tym szczególnie metody elektrycznej, kluczowym problemem



Rys. 2. Budowa sondy impedancyjnej (patent RP nr 429219, 2020 [1]) – opis w tekście
Fig. 2. Cross section of the impedance probe (patent RP no. 429219, 2020 [1]) – description in the article

ne przewodami pomiarowymi (3) z urządzeniem pomiarowo-rejestrującym. Sorbent przylega ściśle do pobocznic otworu pomiarowego, wywierconego w badanym murze, dzięki pneumatycznemu mechanizmowi dociskowemu (4). Za pomocą wentyla (5), połączonego króćcem (6), wprowadzane jest powietrze pompką, co po uzyska-

wymagającym rozwiązania jest skalowanie całego układu pomiarowego nazywane również kalibracją [7].

Skala kalibracji

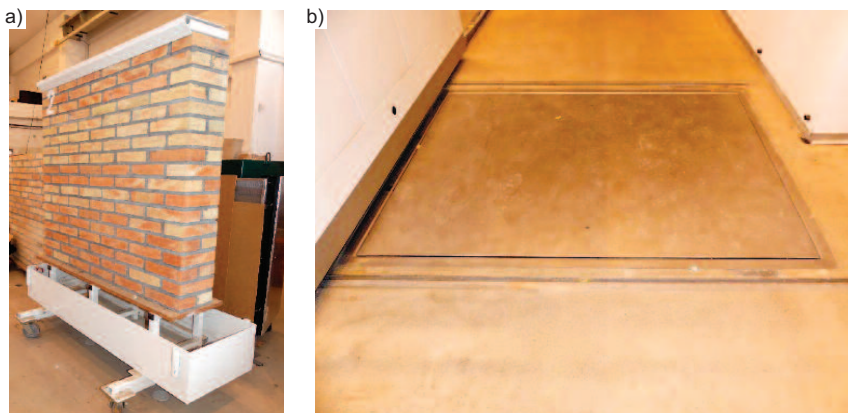
Procedury kalibracyjne aparatury stosowanej do monitorowania *in situ* wilgotności murów nie są jednoznacznie określone. Wynika to z wielu powodów, a przede wszystkim z nieskończonej liczby złożonych struktur o wielofazowym składzie. Aktualnie pomiary wykonywane metodami elektrycznymi mają cha-

rakter przybliżony, a urządzenia pomiarowe nie podlegają standardowemu wzorcowaniu.

Na dokładność metody pomiarowej, definiowanej jako stopień zgodności wyniku pomiaru z wartością rzeczywistą wilgotności, wywierają wpływ różne czynniki. Wiadomo jednak, że tzw. wartości prawdziwe nie będą nigdy znane i trzeba zadowolić się wartościami przybliżonymi, a nawet jedynie możliwością poznania zachodzących w murze zmian tempa nawadniania czy suszenia. W diagnostyce budowli za wartości prawdziwe uznaje się (umownie) wyniki uzyskiwane z zastosowaniem metod gravimetrycznych. Skalowanie powinno zatem obejmować kontrolę stanu zawilgocenia wzorców metodą „wagową”.

Ze względu na nieliniowość występujących zależności, wzorcowanie wykonywano w wielu charakterystycznych punktach, które dobierano odpowiednio do zakresu pomiarowego kalibrowanego układu. Opracowane czujniki są przeznaczone głównie do pomiaru w zakresie ponad-sorpcyjnym (od zawartości wilgoci kapilarnej do pełnego nawodnienia), co jest istotną zaletą w porównaniu ze stosowaniem np. czujników rejestrujących wilgotność powietrza w otoczeniu materiału. Wzorce były zawilgacane i kondycjonowane do zadanych pięciu poziomów zawartości wilgoci – od 2,5% do pełnego nasycenia kapilarno-porowatej struktury. Nasiąkliwość badanych nowych cegieł ceramicznych, a także pobieranych z obiektów zabytkowych wynosi od 18 do nawet 33%, a największą porowatość miały cegły pobrane podczas prac remontowych z muru zamku gotyckiego w Ostródzie.

Początkowo przyjęto założenie, że skalowanie będzie przeprowadzane na wzorcach wykonanych w skali 1 : 1. Wymagało to jednak odpowiednio wyposażonego zaplecza laboratoryjnego. Mury w skali 1 : 1 o wymiarach 150 x 150 x 25 cm (fotografia 1) poddawano pełnemu nawadnianiu przez automatyczne polewanie wodą od góry. Umożliwiało to specjalistyczne oprzyrządowanie i pompa obiegowa wody. Naturalne zawilgacanie muru przez podciąganie kapilarne od dołu nie mogło być jednak stosowane ze względu na ograniczony zasięg tego zjawiska. Nasycone mury poddawano kondycjonowaniu, okresowemu suszeniu i następnie ponow-



Fot. 1. Kalibracja czujników w skali 1:1: a) wzorec wilgotności muru w skali 1:1; b) stanowisko najazdowe do ważenia modeli w zakresie do 3000 ±0,5 kg

Photo 1. Calibration of sensors in a 1:1 scale, a) moisture wall standard in a 1:1 scale; b) drive-on station for weighing models in the range of up to 3000 ±0.5 kg

nemu kondycjonowaniu w komorze klimatycznej. Przyjęcie takiej skali wykonania wzorców jest na tyle pracochłonne i długotrwałe, że ustalenie niepewności pomiaru (określenie rozrzutu wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej zawartości wilgoci) nie było możliwe ze względu na zbyt małą liczbę uzyskanych wyników [7].

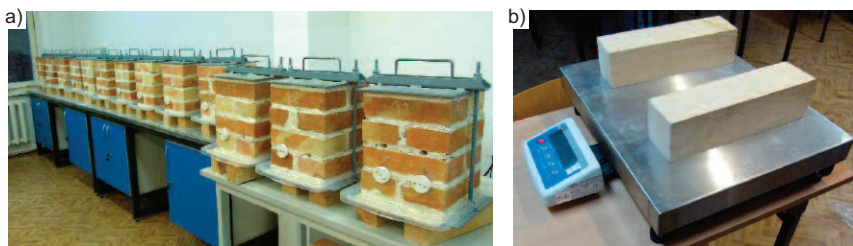
Nawodniony model przedstawiony na fotografii 1 waży ok. 1300 kg, a każde kolejne kondycjonowanie do oczekiwanej zawartości wilgoci – przeprowadzone w specjalistycznej komorze, w warunkach izotermicznych, trwało ponad 40 dni. Transport wzorca na stanowisko ważenia za pomocą wagi elektronicznej zainstalowanej w podłodze (fotografia 1b), o zakresie do 3000 ± 0,5 kg (pomimo zastosowania specjalnie opracowanych podwozi jezdnych), był czynnością wymagającą wieloosobowej obsługi, jak również przeprowadzania adiustacji wagi elektronicznej.

Ze względu na utrudnienia w prowadzeniu kalibracji w skali 1 : 1 wykonano kolejną serię wzorców wilgotności murów w mniejszej skali (fotografia 2a). W tym przypadku murki mogły być przenoszone ręcznie i ważone okresowo na wadze przedstawionej na fotografii 2b. Z technologicznego punktu widzenia procedura nadal była jednak zbyt pracochłonna i przede wszystkim czasochłonna. Okres kondycjonowania w szczelnych osłonach wykonanych z folii stretch, w celu zapewnienia zadowalającej jednorodności rozkładu zawartości wilgoci w całej objętości próbki, trwał ponad 30 dni. Stan stabilizacji i wyrównania zawartości wil-

goci w modelach oceniano za pomocą systemu detekcji promieniowania podczerwonego. Wyrównanie temperatury powierzchni modeli wskazywało na zakończenie procesu kondycjonowania.

Podczas obracania wzorcowych murków w celu wyeliminowania wpływu grawitacji na rozkład zawilgocenia, a także wykonywania otworów do instalacji czujników zdarzały się przypadki odspajania cegieł lub zaprawy. Eliminowało to uszkodzony model z dalszych badań. W celu zabezpieczenia przed odspajaniem się cegieł wykonano stalowe obejmy zapewniające spójność wzorców (fotografia 2a).

Konieczność skrócenia długotrwałego procesu stabilizacji wilgoci w objętości wzorców wpłynęła na przeprowadzenie trzeciej serii kalibracji na mniejszych próbkach w postaci walców wycinanych koronką diamentową o średnicy 100 mm. Otwory do wprowadzenia czujników wykonywano również techniką bezударową koronkami diamentowymi o średnicy 12 mm. Wzorce miały średnicę 98 mm i wysokość 90 ± 1 mm. Na obecnym etapie oczekiwane wartości zawilgocenia uzyskiwano metodą obniżania zawartości wilgoci od stanu pełnego nasycenia wodą do stanu sorpcyjnego. W celu przyspieszenia zmiany i kondycjonowania zawartości wilgoci do oczekiwanego poziomu wykorzystywano suszenie termopróżniowe. W perspektywie badania zostaną powtórzone przy nawadnianiu wzorców, co pozwoli ustalić ewentualny wpływ histerezy procesu nawadniania i suszenia. Należy przewidywać, że przy zawartości wilgoci zbliżonej do sorpcyjnej będzie za-



Fot. 2. Kalibracja czujników w skali średniej: a) wzorce wilgotności muru; b) waga stołowa
Photo 2. Medium scale models to calibrate sensors: a) moisture wall standards; b) bench scale

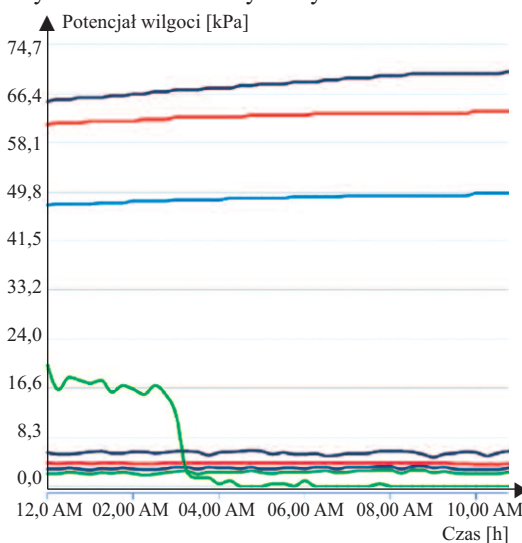
uważalny wpływ stanu poprzedzającego na wartość sygnałów elektrycznych. Natomiast przy wzroście wilgoć pendularna zmieni swoje położenie w kapilarach w stosunku do obecnie stosowanego procesu suszenia (przy analogicznej wartości wilgotności średniej – wagowej). Może być również widoczny wpływ zawartości soli ze względu na procesy krystalizacji i dekrystalizacji zachodzące w modelach.

Badane wzorce z zamontowanymi dwustronnie czujnikami, za pomocą specjalnie opracowanych ścisków stabilizujących ich położenie, przedstawiono na fotografii 3. Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić wstępną listę czynników zakłócających pomiar. Należy do nich przede wszystkim **polaryzacja materiału**. Na obecnym etapie badań, w celu ograniczenia wpływu polaryzacji, zastosowano mostkowanie elektrod w przerwach między wysyłanymi sygnałami elektrycznymi. Uzyskane efekty można uznać za satysfakcjonujące. Wielkość tak wykonanych wzorców umożliwia znaczne zwiększenie niezbędnej liczby pomiarów w celu określenia odchylenia standardowego, charakteryzującego rozrzut wyników serii n pomiarów tej samej wielkości mierzonej [7], na drodze eksperymentalnej.



Fot. 3. Kalibracja czujników z wykorzystaniem rdzeni o średnicy 98 mm
Photo 3. Calibration of sensors using ceramic cores with a diameter of 98 mm

Przykładowy przebieg zmiany zawartości wilgoci w murze testowym, zarejestrowany z wykorzystaniem czujników wzorcowanych wg opisanej procedury, przedstawiono na rysunku 3. Na osi pionowej występują jednostki potencjału wilgoci [kPa], co wynika z głównego przeznaczenia testowanego układu, przewidzianego do prognozowania efektów suszarniczych murów masowych w obiektach zabytkowych.



Rys. 3. Przykładowa rejestracja przebiegu sygnałów elektrycznych w czasie w jednostkach potencjału wilgoci [kPa]
Fig. 3. An example of recording the course of electrical signals in time in units of moisture potential [kPa]

Podsumowanie

Optymalną wielkość wzorców do skalowania czujników, przy której zminimalizowano wpływy czynników zakłócających, dobrano na podstawie długotrwałych badań. Wiarygodny pomiar średniej zawartości wilgoci, przy skali 1 : 1 i wadze przekraczającej 1300 kg, jest uciążliwy i wymagał zastosowania specjalistycznego oprzyrządowania. Jedyną, jak dotychczas, **dopuszczoną metodą pomiaru wilgotności wzorców jest bezpośredni pomiar gravimetryczny**. Wielokrotnie powtarzane czynności ważenia, kondycjonowania i pomiaru od-

powiedzi sygnałów elektrycznych wykazały, że kalibrowanie czujników może być przeprowadzone na wzorcach walcowych o średnicy 98 mm. Zaobserwowano i ustalono również zasięg długotrwałego oddziaływania przyrządów pomiarowych na badane materiały. W celu zminimalizowania wpływu wysyłanych cyklicznie sygnałów elektrycznych na polaryzację wilgotnego ośrodka wprowadzono mostkowanie elektrod w przerwach między sygnałami pomiarowymi. Zaobserwowano również, że alternatywnym działaniem może być naprzemienna zmiana biegunów przewodów pomiarowych. Wdrożenie tej koncepcji w wersji automatycznej wymaga opracowania nowego układu pomiarowego. Badania są kontynuowane i obejmują również rdzenie pobrane z murów o zróżnicowanym zasoleniu, a także inne materiały, jak np. beton, cegła silikatowa czy ABK.

Literatura

- [1] Wójcik R. Patent RP P. nr 429219, 2020 r. Sonda impedancyjna do monitorowania zawartości wilgoci w przegrodach budowlanych, zwłaszcza w murach ceglanych, 2020.
- [2] Chanet M, Riviere C, Eynard P. Electric impedance spectrometry for the control of manufacturing process of comminuted meat products. *Journal of Food Engineering*. 1999; 42: 153 – 159.
- [3] Hall C, Hoff W. *Water Transport in Brick Stone and Concrete*. Spon Press an Imprint of Taylor & Francis. 2012; London and New York.
- [4] Hoła J, Matkowski Z, Schabowicz K. Tomografia impedancyjna w badaniach zawilgoconych murów ceglanych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*. Kraków. 2007; 73-81.
- [5] McCarter WJ. A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration. *Cement and Concrete Research*. 1994; 24: 1097 – 1110.

- [6] Suchorab Z, Widomski MK, Łagód G, Barnat-Hunek D, Majerek D. A Noninvasive TDR Sensor to Measure the Moisture Content of Rigid Porous Materials. *Sensors*. 2018; 18: 3935.
- [7] Arendarski J. Niepewność pomiarów. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2003.
- [8] Zhang T, Shen R, Lin CH, Yin H, Wang S. Measuring moisture content in a porous insulation material using a hot wire. *Building and Environment*. 2015; 84: 22 – 31.
- [9] Brzyki P, Suchorab Z. Capillary Uptake Monitoring in Lime-Hemp-Perlite Composite Using the Time Domain Reflectometry Sensing Technique for Moisture Detection in Building Composites. *Materials*. 2020; 13 (7): 1677.

Przyjęto do druku: 08.03.2023 r.