CZASOPISMO TECHNICZNE Ś
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 3-Ś/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6336

PIOTR WITAKOWSKI*

ZDALNE MONITOROWANIE ZMIAN WEWNĘTRZNEJ WILGOTNOŚCI KONSTRUKCJI

REMOTE MONITORING OF CHANGES OF STRUCTURE INNER HUMIDITY

Streszczenie

W artykule przedstawiono system zdalnego pomiaru wilgotności wewnętrznej konstrukcji budowlanych. System wchodzi w skład ogólniejszego system kompleksowego zarządzania jakości w budownictwie. Opisano aparaturę wykorzystywaną w systemie, sposób jej instalacji w konstrukcjach budowlanych i pierwsze testy wykonane w laboratorium i *in situ* w obiektach budowlanych.

Słowa kluczowe: *system informatyczny*, *badanie wilgotności*, *czujnik wilgotności*

Abstract

The paper presents a system for remote measurements of humidity inside building structures. The system is a part of more general system for total quality management in civil engineering. The apparatus used in the system has been described and method of its installation in structures. The first laboratory tests and tests made *in situ* are presented.

Keywords: *information system*, *humidity investigation*, *humidity sensor*

* Dr hab. inż. Piotr Witakowski, prof. AGH, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Zdalny monitoring w budownictwie

Ostatnie lata są okresem bardzo dynamicznego rozwoju systemów monitorowania w wielu dziedzinach gospodarki. Przeciętny człowiek styka się z nimi najczęściej w obiektach handlowych lub w obiektach, do których dostęp podlega ochronie, ale są one stosowane również w wielu gałęziach przemysłu i nauki – wszędzie tam, gdzie stała obecność człowieka nie jest możliwa, a informacje z tego miejsca muszą być pobierane w sposób nieprzerwany. Monitoring często mylony jest z obserwacją. Trzeba więc podkreślić, że monitoring nie jest obserwacją, aczkolwiek w skład monitoringu wchodzi obserwacja. Monitoring (od łacińskiego słowa *monitor* – ostrzegający, przypominający) jest to działalność mająca na celu wykrywanie zagrożeń. Co za tym idzie, niezbędne przy monitoringu jest wcześniejsze ustalenie rodzaju zagrożenia – określenie **warunku monitoringu** – i dostosowanie systemu monitorowania do tego zagrożenia oraz ustalenie sposobu informowania o zagrożeniu. System monitoringu musi się więc składać zawsze z dwóch podsystemów: obserwacyjnego i ostrzegawczego. Podsystem obserwacyjny musi umożliwiać pozyskiwanie informacji stosownych do rodzaju potencjalnego zagrożenia. System ostrzegawczy musi być wyposażony w możliwość analizy obserwacji, porównywania jej ze stanami alarmowymi i przekazywania informacji o wystąpieniu stanów alarmowych pod z góry ustalone adresy.

Systemy monitorowania coraz częściej stosowane są również w budownictwie. Spośród 5 etapów, które składają się na cykl życia obiektu budowlanego, takich jak:

1) koncepcja,
2) projektowanie,
3) realizacja,
4) eksploatacja,
5) rozbiórka,

z punktu widzenia potrzeb monitoringu najważniejsze znaczenie mają etapy realizacji i eksploatacji. W etapie realizacji monitorowanie obiektu jest konieczne w celu wprowadzenia systemów zarządzania jakością. W etapie eksploatacji najważniejszym celem monitorowania jest zapobieganie katastrofom budowlanym. W każdym z tych etapów istnieją jednak inne zagrożenia [1], co za tym idzie, inaczej musi być sformułowany warunek monitoringu. W fazie realizacji największe zagrożenia mogą się pojawić z powodu utraty monolityczności w konstrukcjach betonowych i żelbetowych oraz zagrożenie wskutek utraty stateczności. W fazie eksploatacji największe zagrożenia to zagrożenie pożarowe i zagrożenie utratą nośności i stateczności konstrukcji.

Niezależnie do wspomnianych zagrożeń związanych z bezpieczeństwem konstrukcji systemy monitorowania w etapie realizacji zaczynają być stosowane na placu budowy wszędzie tam, gdzie trwają procesy decydujące o jakości prac [2, 3]. Natomiast w etapie eksploatacji systemy takie często są stosowane tam, gdzie toczą się procesy decydujące o trwałości obiektu i jakości jego użytkowania [4].

W każdym przypadku podstawowe znaczenie mają systemy zdalnego monitoringu (ang. *Remote Monitoring System*), a w przypadku zabezpieczania obiektów budowlanych przed stanami awaryjnymi możemy już mówić wyłącznie o monitoringu zdalnym. Przy takim monitoringu obserwator jest w miejscu na tyle odległym od miejsca obserwacji, że przekaz informacji z obiektu monitorowanego do obserwatora wymaga zastosowania odrębnej

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

technologii transmisji. Do obserwatora może być przekazywana całość zarejestrowanej informacji lub też jedynie informacja wytworzona przez podsystem ostrzegawczy.

W każdym przypadku na system zdalnego monitoringu RSM składają się zawsze 4 segmenty [1]:

1) obserwacji (czujnika),
2) transmisji,
3) analizy (centrali),
4) dystrybucji.

Segment obserwacji obejmuje wszelkie instalacje na obiekcie – czujniki, sondy, rejestratory, modemy, okablowanie itp. Rodzaj i rozmieszczenie czujników pomiarowych muszą być dostosowane do warunku monitoringu. Segment transmisji odpowiada za przekazanie obserwacji wykonanych przez segment obserwacji do ośrodka, w którym analizowane są poczynione obserwacje i identyfikowane jest potencjalne zagrożenie określone przez warunek monitoringu. Segment analizy obejmuje centralę systemu wraz z niezbędnym oprogramowaniem umożliwiającym analizę zaobserwowanych wyników. Segment dystrybucji powinien umożliwiać przekazywanie wyników analizy w dowolne miejsce kraju. W systemach internetowych, tj. gdy segment transmisji korzysta z Internetu, również segment dystrybucji działa, opierając się na tym samym medium. Jeśli w segmencie transmisji wykorzystywany jest Internet, wówczas system nazywa się **systemem internetowym**.

Spośród wszystkich systemów zdalnego monitorowania na szczególną uwagę zasługują systemy monitoringu wizualnego (ang. *Remote Video Monitoring*), określane symbolem RVM. Odnotowuje się bardzo dynamiczny rozwój tych systemów i ich szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki. W systemach tych obserwacje są obrazami zdjętymi (zarejestrowanymi) przez urządzenia wizyjne – czujnikami są tu kamery lub aparaty fotograficzne. Dzięki temu systemy te mogą dostarczać znacznie większej ilości informacji niż inne. Równoczesny rozwój urządzeń wizyjnych i powstanie systemów telewizji przemysłowej CCTV (ang. *Close Circuit Tele-Vision*) umożliwiło zastosowanie tych systemów w wielu dziedzinach i powoduje nadal stale rosnące potrzeby w zakresie monitoringu wizyjnego. Jednym z obszarów stosowania tych systemów jest monitoring obiektów budowlanych.

2. Centrum usług zarządzania jakością w budownictwie

W Instytucie Techniki Budowlanej trwają od kilku lat prace zmierzające do budowy Centrum Usług Zarządzania Jakością w Budownictwie [5]. Zakres świadczonych usług ma przede wszystkim obejmować wszystkie rodzaje budownictwa betonowego jako tego budownictwa, które stawia największe wymagania systemom jakości i ma dotyczyć w pierwszym etapie fazy realizacji dla tego budownictwa. W dalszej kolejności zakres usług ma być rozszerzony na inne rodzaje budownictwa i na fazę eksploatacji. Zasięg działania tego Centrum w toku dotychczasowych prac został najpierw sprawdzony przy monitorowaniu budów położonych na terenie Warszawy, a następnie przy monitorowaniu budów położonych w innych miastach (Kraków, Wrocław, Poznań). Nie natrafiono na trudności, które uniemożliwiałyby monitorowanie budów położonych w dowolnym punkcie Europy, jeśli tylko w punkcie tym można zapewnić łączność kablową, internetową lub GSM. Strukturę informatyczną Centrum przedstawiono w tab. 1.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 1

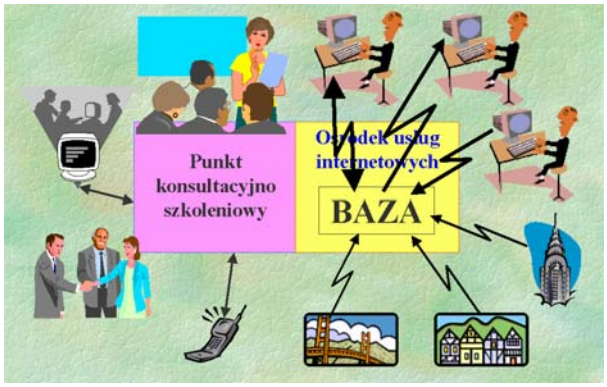
Struktura informatyczna Centrum

<table>
<tr><td colspan="3">SYSTEM ZARZĄDZAJĄCY CENTRUM</td></tr>
<tr><td rowspan="6">BAZA DANYCH</td><td colspan="2">SYSTEM ZARZĄDZANIA BAZĄ DANYCH</td></tr>
<tr><td rowspan="4">SYSTEM ZARZĄDZAJĄCY JAKOŚCIĄ ROBÓT</td><td>A. PODSYSTEMY ZARZADZAJĄCE DLA SZJ</td></tr>
<tr><td>B. PODSYSTEMY ZDALNEGO POMIARU</td></tr>
<tr><td>C. PODSYSTEMY LABORATORYJNE</td></tr>
<tr><td>D. PODSYSTEMY OBLICZENIOWE</td></tr>
<tr><td colspan="2">SYSTEM POWIĄZANIA INWESTYCJI Z TERENEM – MAPINFO</td></tr>
<tr><td colspan="2">OPROGRAMOWANIE WIRTUALNEJ BUDOWY</td></tr>
</table>

Centrum stanowi w istocie szereg zintegrowanych systemów monitorowania połączonych wspólnym segmentem analizy. Segment ten (segment centrali), z którym komunikują się urządzenia pomiarowe i obserwacyjne rozmieszczone na budowach, położony jest na terenie ITB. Segment transmisji bazuje na sieci GSM i Internecie. Zasadniczym zadaniem systemu informatycznego Centrum jest umożliwienie zdalnego zarządzania jakością, a centralną jego częścią jest globalna baza danych i obsługujące ją oprogramowanie. Zlokalizowanie w Centrum zarówno bazy danych, jak też oprogramowania analitycznego umożliwia obsługę systemu przez wykwalifikowany personel oraz pielęgnację i doskonalenie oprogramowania. Zasadniczą zaletą jest jednak fakt, że rozwiązanie takie pozwala na prowadzenie analiz:

1) na podstawie obserwacji i pomiarów wykonanych w tym samym czasie przez różne systemy pomiarowe (analiza kompleksowa),
2) na podstawie obserwacji i pomiarów wykonanych przez ten sam system pomiarowy, lecz w różnym czasie (analiza historyczna),

gdyż w tej samej bazie gromadzone są wyniki pochodzące z różnych czasów i z różnych systemów. Umożliwia to prowadzenie analiz praktycznie niewykonalnych dla kilku oddzielnych systemów monitorowania. Schemat działania Centrum pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat działania Centrum Usług Zarządzania Jakością w Budownictwie

Fig. 1. Scheme of working of Service Centre for Quality Management in Civil Engineering

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Spośród wszystkich systemów informatycznych składających się na Centrum za możliwość zdalnego działania odpowiedzialne są PODSYSTEMY ZDALNEGO POMIARU. W zależności od rodzaju mierzonej wielkości podsystemy te muszą być wyposażone w inny segment obserwacji i dysponować innymi czujnikami. Zakłada się, że centrum powinno umożliwiać monitorowanie wszystkich wielkości interesujących dla inżyniera z punktu widzenia zarządzania jakością [4, 5]. Wśród istniejących podsystemów zdalnej obserwacji na uwagę zasługują podsystemy pomiaru temperatury (SPT) i zdalnej obserwacji wizualnej ZOW. W 2006 r. rozpoczęto budowę podsystemu pomiaru wilgotności (SPW).

Niezależnie od informacji pozyskiwanych przez podsystemy zdalnego pomiaru do analizy można włączać informacje z wielu podsystemów laboratoryjnych umożliwiających badanie własności tych materiałów, które stosowane są na monitorowanej budowie. Pozwala to np. na ustalanie wielkości naprężeń w monitorowanym obiekcie betonowym na podstawie mierzonych bezpośrednio na budowie odkształceń i mierzonej w laboratorium zmiennej sztywności materiału. Można do tego celu wykorzystać istniejący podsystem do badania dynamiki narastania wytrzymałości DNW [6].

3. Wilgoć w materiałach budowlanych

W praktyce budowlanej często zdarzają się sytuacje wymagające określenia wilgotności konstrukcji budowlanej. Z reguły jest to niezbędne przy diagnozowaniu stanu istniejących i eksploatowanych konstrukcji budowlanych, w których wilgoć jest jednym z czynników destrukcyjnych i warunkujących dalszą eksploatację. Decyzja co do sposobu przywrócenia konstrukcji jej użyteczności, a często co do jej rozebrania lub naprawy, zwykle nie jest możliwa bez określenia poziomu zawilgocenia i dróg penetracji wilgoci do jej środka. Również w przypadku prowadzenia prac renowacyjnych i osuszania konstrukcji niezbędne jest stałe monitorowanie stanu zawilgocenia w celu dostosowania do aktualnej sytuacji sposobu osuszania. Niewłaściwa szybkość osuszania może się bowiem stać samoczynnym czynnikiem niszczącym konstrukcję. Wyjątkowego znaczenia problemy te nabierają w przypadku konstrukcji zabytkowych, jak też w przypadku budynków mieszkalnych. Możliwość monitorowania stanu zawilgocenia decyduje wówczas o potrzebie osuszania, koszcie napraw i dopuszczalności konstrukcji do dalszego użytkowania.

Potrzeba monitorowania wilgotności konstrukcji budowlanych nie jest jednak ograniczona do konstrukcji istniejących i eksploatowanych. Drugą ważną dziedziną, w której istnieje potrzeba monitorowania wilgotności konstrukcji jest wznoszenie nowych konstrukcji z betonu. Wilgotność wewnątrz wznoszonej konstrukcji jest wówczas jednym z podstawowych mierników prawidłowości procesu technologicznego, stanowi też ważną informację o stanie zaawansowania procesu hydratacji i dojrzałości betonu. Tym samym może być również miarą wytrzymałości betonu i podstawą do podejmowania ważnych decyzji technologicznych. W konsekwencji więc może decydować o prawidłowości procesu budowy i jego koszcie.

Literatura dotycząca ruchu wilgoci i wymiany ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych jest bardzo obszerna. Jako najważniejsze należy wymienić prace [7–10]. Wśród nich można wyróżnić te, które traktują oddzielnie ruch każdej z faz wilgoci i prace, w których ruch wilgoci opisywany jest za pomocą tzw. potencjału wilgoci. To drugie podejście nie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

znajduje pełnego uzasadnienia – ani fizycznego, ani matematycznego. Co więcej, nie pozwala na opis ruchu wilgoci w temperaturach poniżej 0°C. Analizę niedostatków tego modelu i właściwy pełny opis mechanizmu ruchu wilgoci przedstawiono w [11]. Jako podstawę teoretyczną w niniejszym temacie przyjęto model przedstawiony w tej pracy.

Woda może występować w materiałach budowlanych w 4 różnych formach – jako:

1) woda związana chemicznie,
2) para wodna,
3) wilgoć tzw. sorpcyjna lub błonkowa – związana fizykochemicznie,
4) woda swobodna – związana fizykomechanicznie.

Woda związana chemicznie (inaczej woda konstytutywna) znajduje się w strukturze niektórych materiałów w ścisłych stosunkach ilościowych, np. w związkach typu hydraty w gipsach, zaprawach oraz betonach zwykłych i komórkowych. Jest ona silnie związana z ciałem stałym i oddzielić ją można tylko przez prażenie w odpowiednio wysokiej temperaturze, zależnej od składu chemicznego materiału, lub wskutek reakcji chemicznych. Stosowane przy oznaczaniu wilgotności materiałów suszenie ich do stałej masy prowadzi się w takiej temperaturze, aby nie doprowadzić do uwolnienia wody związanej konstytutywnie lub w inny sposób nie zmienić właściwości materiału (40°C w przypadku gipsów, 70°C w przypadku polimerów i 105°C w przypadku materiałów pochodzenia roślinnego oraz materiałów pochodzenia mineralnego innych niż gipsy). Przy badaniu wilgotności nie wolno usunąć wody związanej chemicznie.

Para wodna to woda swobodna w postaci gazowej występująca w porach materiału. W zależności od temperatury ta sama ilość pary powoduje różną wilgotność względną RH powietrza wypełniającego pory. Wilgotność względną podaje się w %, przez co rozumie się procent tej ilości wody, jaka niezbędna jest do powstania pary nasyconej – tj. maksymalnej ilości wody, jaka może być zgromadzona w powietrzu wypełniającym pory. Powyżej tej ilości woda może występować tylko w postaci ciekłej lub stałej (lód).

Woda związana fizykochemicznie (inaczej wilgoć sorpcyjna lub błonkowa) w materiałach budowlanych występuje na rozwiniętej powierzchni porów i kapilar materiału. Zjawisko to związane jest z istnieniem tzw. sił van der Waalsa oddziaływujących na cząstki gazu w pobliżu powierzchni ciała stałego. Z ustaloną wilgotnością względną RH pary wodnej w porach materiału związana jest określona ilość wody sorpocyjnej. Ilość ta różni się nieco w zależności od tego, czy wilgotność ciała rośnie, czy maleje – zjawisko wykazuje histerezę.

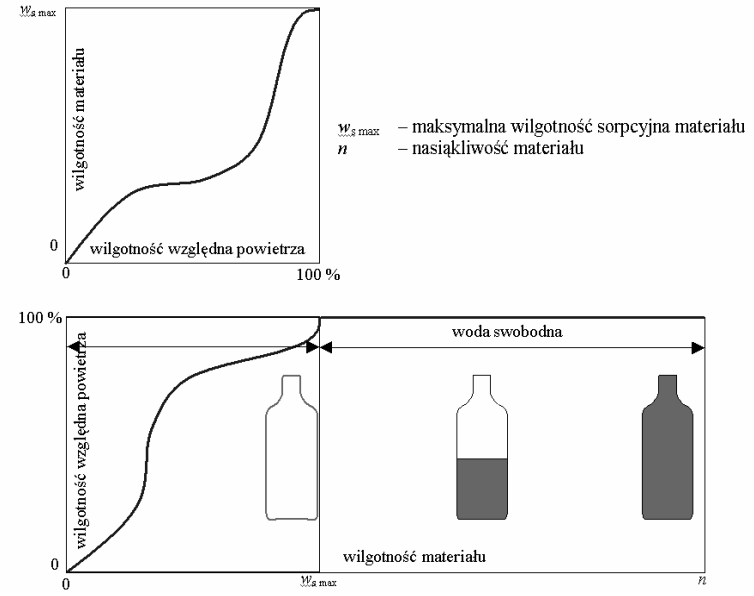
Woda swobodna pojawia się w porach materiału, gdy ilość wchłoniętej przez materiał wilgoci jest większa niż wynika to z nasycenia pary w porach i towarzyszącej jej wody sorpcyjnej – jest to woda zawarta w porach, tak jak woda w butelce.

4. Pomiar wilgotności materiałów i konstrukcji budowlanych

Istnieją liczne urządzenia umożliwiające pomiar wilgotności – wilgotnościomierze zwane inaczej higrometrami. Ich konstrukcja różni się w zależności od przeznaczenia. Inną konstrukcję mają wilgotnościomierze do pomiaru wilgotności powietrza – mierzą one wilgotność względną RH, a inną wilgotnościomierze do pomiaru wilgotności w materiałach. Mogą one działać na różnych zasadach i być wyposażone w różne oprzyrządowanie dodatkowe dostosowane do pomiaru wilgotności w określonym materiale – w zbożu, w drewnie,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

w gruncie lub w betonie. Zwykle wyposażone są one w sondę, którą wbija się w badany materiał, lecz istnieją też sondy dotykowe. Zasada pomiaru zależy od zastosowanego czujnika i może się opierać na pomiarze rezystancji lub pojemności (por. rys. 3). Przyrządy te w każdym przypadku mierzą wilgotność powierzchni materiału i w każdym przypadku wymagają wycechowania. Celem budowy systemu SPW jest umożliwienie pomiarów wilgotności w dowolnym materiale (również w powietrzu) i wewnątrz konstrukcji na dowolnej głębokości od powierzchni. Wymaga to budowy całego systemu od początku.



Rys. 2. Ilustracja różnej postaci wody w porach materiału budowlanego

Fig. 2. Illustration of various forms of water in pores of building material

W wyniku doświadczeń i analiz stwierdzono, że dla pełnej uniwersalności niezbędne jest włączenie do systemu dwóch rodzajów czujników pracujących na różnych zasadach. Pierwszy rodzaj czujników powinien umożliwiać pomiar wilgotności w dowolnym miejscu i czasie w zakresie od 0 do 100% wilgotności względnej RH w powietrzu. Zastosowany do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych umożliwia pomiar wilgotności w materiale na podstawie wilgotności powietrza porowego. Jego zakres ogranicza się do maksymalnej wielkości sorpcyjnej materiału. Wilgotność jest przy tym pomiarze rozumiana jako stosunek masy wody do masy powietrza zawierającego tę wodę. Drugi rodzaj czujników przeznaczony jest do pomiaru wilgotności w materiałach budowlanych. W tym przypadku wilgotność mierzy się jako stosunek masy wody do masy zawierającego ją materiału.

Tak pomyślany system może mierzyć z dobrą dokładnością wilgotność w każdym ośrodku. W szczególności:

– umożliwi optymalizację prac osuszających w konstrukcjach zawilgoconych – pozwoli na zaoszczędzenie energii i czasu trwania operacji osuszania,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– umożliwi optymalizację metod pielęgnacji wznoszonych konstrukcji betonowych – pozwoli na skrócenie czasu wykonywania konstrukcji i obniżenie kosztów (krótszy czas rozdeskowania), a jednocześnie przyczyni się do podniesienia jakości wykonawstwa.



Rys. 3. Widok wilgotnościomierza materiałów LB-795 produkcji firmy LAB-EL. Wilgotnościomierz może pracować, opierając się na pomiarze rezystancji lub pojemności

Fig. 3. The view of hygrometer LB-795 production of LAB-EL firm. The hygrometer can work at resistance or capacity measurement

5. Ogólna koncepcja systemu SPW

Przyjęto, że podsystem SPW będzie miał zasadniczą strukturę identyczną jak wcześniej zbudowany i od kilku już lat eksploatowany system zdalnego pomiaru temperatury SPT. Różnice muszą dotyczyć segmentu czujnika – do pomiaru wilgotności konieczne są inne czujniki niż do pomiaru temperatury, przy czym dla pełnego pokrycia zakresu wilgotności w różnych materiałach muszą to być dwa różne czujniki.

Jako czujnik do pomiaru wilgotności względnej powietrza przyjęto czujnik Honeywella. Jego działanie oparte jest na pomiarze stałej dielektrycznej specjalnej porowatej masy, której stała dielektryczna zależy od wilgotności powietrza. Czujnik ten jest stosowany do pomiaru wilgotności w powietrzu, a w materiałach stałych wówczas, gdy chodzi o dokładne oznaczenie wilgotności przy założeniu, że jest ona mniejsza od maksymalnej wilgotności sorpcyjnej. Czujnik ten dla odróżnienia będziemy odtąd oznaczać symbolem H, a podsystem z jego wykorzystaniem **SPW(H)**.

Drugim czujnikiem jest czujnik rezystancyjny bazujący na pomiarze oporności elektrycznej. Jest on stosowany do pomiaru wilgotności w ciałach stałych w przypadkach, gdy wilgotność jest wyższa od maksymalnej wilgotności sorpcyjnej, a więc gdy występuje w materiale woda swobodna przynajmniej częściowo wypełniająca pory materiału. Czujnik ten dla odróżnienia będziemy odtąd oznaczać symbolem R, a podsystem z jego wykorzystaniem **SPW(R)**.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Cały segment czujnika podsystemu SPW został zbudowany w sposób uniwersalny, tzn. umożliwiający jednoczesne stosowanie obu rodzajów czujników nawet dołączanych do tego samego rejestratora. Rejestrator powinien samoczynnie identyfikować typ czujnika, lecz powinien też mieć możliwość pracy niezależnie od rodzaju i liczby czujników poszczególnych typów.

5.1. Sensor systemu SPW(H)

Po przeprowadzeniu analizy dostępnych w handlu czujników ustalono, że najbardziej właściwe dla budowy systemu **SPW** będą sensory typu HIH-3610-004 produkcji firmy Honeywell. Widok czujnika przedstawiono na rys. 4. Podstawowe cechy sensora to:
- odlewana obudowa z termoutwardzalnego plastiku z pokryciem,
- napięciowy sygnał wyjściowy liniowo zależny od wilgotności względnej,
- laserowo kontrolowana wymienialność,
- niski pobór mocy,
- wysoka dokładność,
- szybki czas reakcji,
- stabilność, niski dryft (niezależność wskazań od czasu),
- chemiczna odporność.



Rys. 4. Sensor wilgotności HIH-3610-004 produkcji firmy Honeywell

Fig. 4. Humidity sensor HIH-3610-004 of Honeywell firm production

Najistotniejszymi cechami sensora HIH-3610-004 są jego niewielkie rozmiary i parametry pomiarowe. Rozstaw końcówek do lutowania wynosi jedynie 1,27 mm. Sensor ma możliwość pomiaru wilgotności w pełnym zakresie od 0 do 100% wilgotności z dokładnością do ±2%, co przy pomiarze wilgotności należy uznać za bardzo dużą dokładność. Elementem aktywnym w sensorze jest płytka z porowatej platyny w okładzinie z termoutwardzalnego plastiku.

5.2. Sensor systemu SPW(R)

Czujnik ten służy do pomiaru wilgotności przez pomiar rezystancji materiału. Zbudowany jest na bazie układu AD7417 firmy Analog Devices (przetwornik analogowo-cyfrowy z wyjściem szeregowym I2C). Konstrukcja umożliwia automatyczne rozpoznanie typu czujnika wilgotności (H lub R). Układ zmontowany jest na płytce drukowanej 55 x 12 mm,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

połączenie z modułem rejestratora za pomocą 4-żyłowego przewodu. Każdy czujnik może mieć przyporządkowany adres od 1 do 8 poprzez zwarcie lub rozwarcie odpowiednich punktów na płytce drukowanej. Jednocześnie może pracować do 8 czujników na wspólnej szynie danych, dozwolone jest mieszanie czujników wilgotności i temperatury na wspólnej szynie.

Podstawowe dane techniczne czujnika:

Zakres pomiarowy: 10 kΩ do 1600 kΩ, skala pomiarowa jest nieliniowa (zbliżona do hiperbolicznej), rzeczywista rozdzielczość pomiaru zmienia się od 1 kΩ na początku zakresu do 3 kΩ na końcu.

Błąd pomiaru: ±2,5% (w temp. 25°C, bez kondensacji).

Dopuszczalna temperatura otoczenia: –20...+70°C

6. Budowa systemu SPW

6.1. Sonda SPW(H)

Do rejestratora może być dołączonych od 1 do 8 czujników. Podłącza się je do wspólnej magistrali, na której każdy z czujników musi mieć swój adres. Możliwość tę uzyskano przez zbudowanie czujników w postaci układu złożonego z sensora, przetwornika analogowo-cyfrowego, podzespołów towarzyszących i specjalnego szczelnego złącza. Powstał w ten sposób podzespół, który będziemy nazywać czujnikiem zintegrowanym lub, gdy nie budzi to niejasności – czujnikiem. Każdy z takich czujników ma złącze pozwalające na podpięcie do magistrali następnych czujników w sposób szeregowy. Dla uchronienia czujnika od uszkodzeń mechanicznych umieszcza się go w obudowie w postaci rurki z tworzywa sztucznego i zalewa masą izolacyjną. Sensor kontaktuje się z otoczeniem przez specjalne okienko zabezpieczone siatką miedzianą – por. fot. 1.



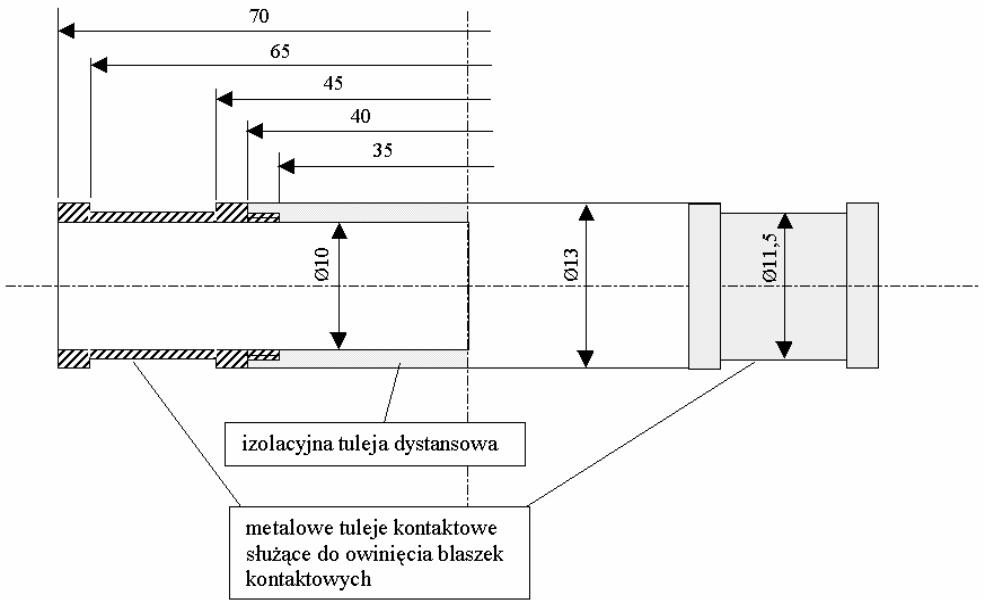
Fot. 1. Czujnik systemu SPW(H) po zabudowaniu w osłonie

Photo 1. The gauge of SPW(H) system after building in shield

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6.2. Sonda SPW(R)

Czujnik zintegrowany sondy SPW(R) ma podobne wymiary, lecz inną konstrukcję – por. rys. 5.

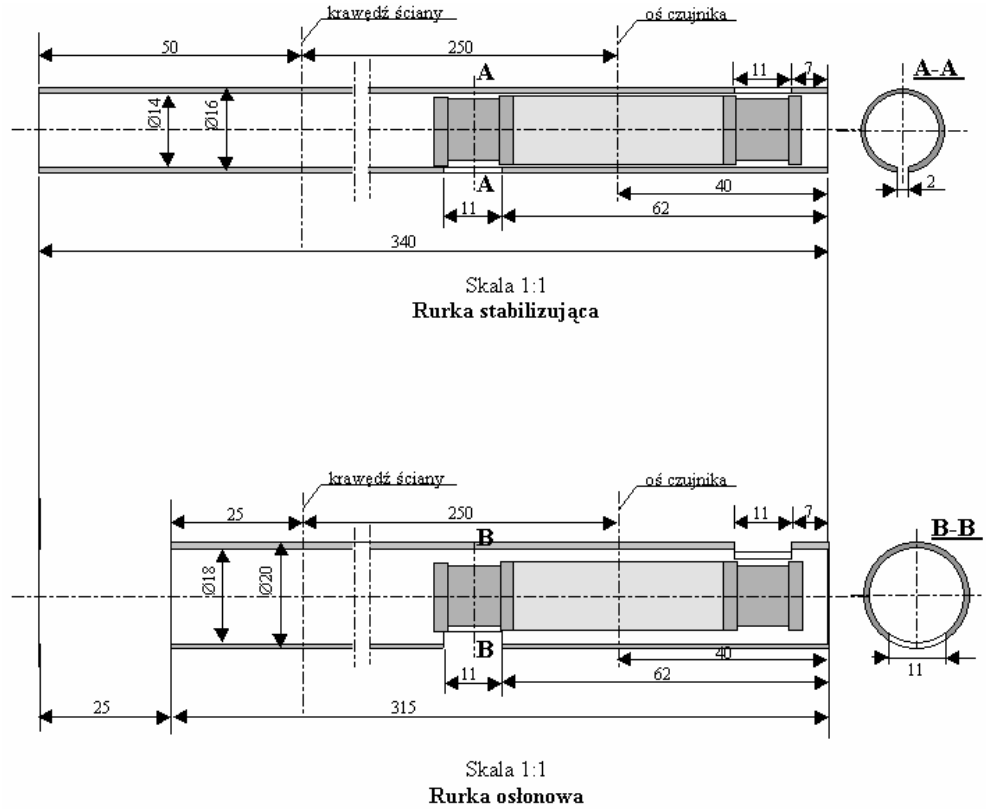


Rys. 5. Przekrój podłużny przez zintegrowany czujnik rezystancyjny

Fig. 5. Section across a integrated resistance gauge

Zasadniczym elementem konstrukcyjnym jest tuleja dystansowa z materiału izolacyjnego zakończona tulejami kontaktowymi, w której mieści się układ elektryczny czujnika. Wokół tych tulei owinięte są blaszki kontaktowe, które kontaktują się fizycznie z badanym materiałem. Miarą wilgotności badanego materiału jest rezystancja między blaszkami kontaktowymi. Czujnik działa na zasadzie pomiaru rezystancji między blaszkami kontaktowymi owiniętymi wokół tulejek kontaktowych. Blaszki opierają się sprężyście o ścianę otworu, wewnątrz którego umieszczony jest czujnik (podobnie jak przy pomiarze temperatury). Czujniki umieszczane są w rurce dystansowej z PCV w odległościach od końca wynikających z pożądanej dyslokacji podczas pomiarów. Blaszki kontaktowe wystają na zewnątrz rurki kontaktowej przez specjalnie wycięte okienka. Podczas instalacji w otworze pomiarowym rurkę dystansową z czujnikami umieszcza się w rurce osłonowej mającej okienka naprzeciwko okienek w rurce dystansowej – rys. 6. Po wprowadzeniu całego zestawu na pożądaną głębokość przez obrót rurki dystansowej wyprowadza się blaszki kontaktowe przez okienka rurki osłonowej i sonda przyjmuje położenie pomiarowe.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 6. Konstrukcja sondy SPW(R)

Fig. 6. Construction of SPW(R) sonde

6.3. Rejestrator

Rejestrator wykonała firma INES. Konstrukcja rejestratora spełnia wszystkie wcześniej wymienione wymagania. Rejestrator zawiera w sobie modem GSM typu FALCOM A2D--900-A-1-1 produkcji niemieckiej firmy FUNKANLAGEN Leipoldt oraz odbiornik GPS. Ponadto zawiera w sobie odbiornik GPS typu LASSEN SK II.

Dokładność odbiornika GPS w pojedynczym namiarze wynosi 25 m (z prawdopodobieństwem 50%). Utrzymywanie w jednej i tej samej pozycji pozwala na poprawę dokładności nawet do 1 m. Pozwala to na wystarczającą dokładność w pozycjonowaniu sond wilgotności.

Widok zmontowanego rejestratora wilgotności przedstawiono na fot. 2. Rejestrator jest zasilany z 6 baterii typu R6. Zastosowanie baterii alkalicznych pozwala na pracę rejestratora przez 4 tygodnie bez potrzeby wymiany baterii.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



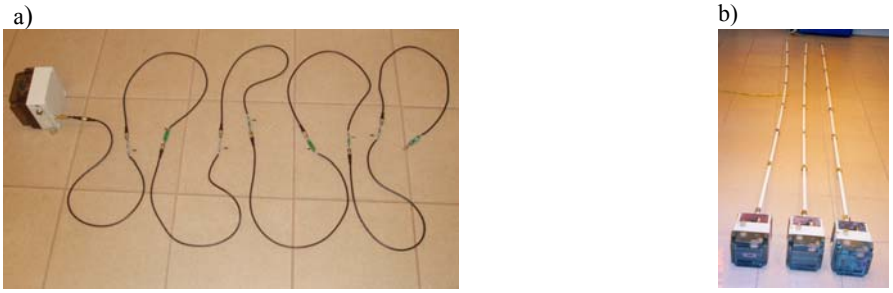
Fot. 2. Widok rejestratora po zmontowaniu

Photo 2. The recorder after assembling

6.4. Moduł pomiarowy

Moduł pomiarowy tworzy rejestrator wraz z podłączonymi do niego czujnikami. Czujniki mogą tworzyć jedną sondę – kiedy umieszczone są wszystkie szeregowo – por. fot. 3. Można jednak połączyć je szeregowo-równolegle w dowolnym układzie, a w skrajnym przypadku wszystkie czujniki mogą być wpięte równolegle do rejestratora.

a) b)



Fot. 3. Moduł pomiarowy: a) szeregowe połączenie wszystkich czujników, b) sondy po włożeniu do rurek dystansowych przygotowane do instalacji

Photo 3. The measurement module: a) serial connection of all gauges, b) soundes after imbedding in installation pipes ready to installation

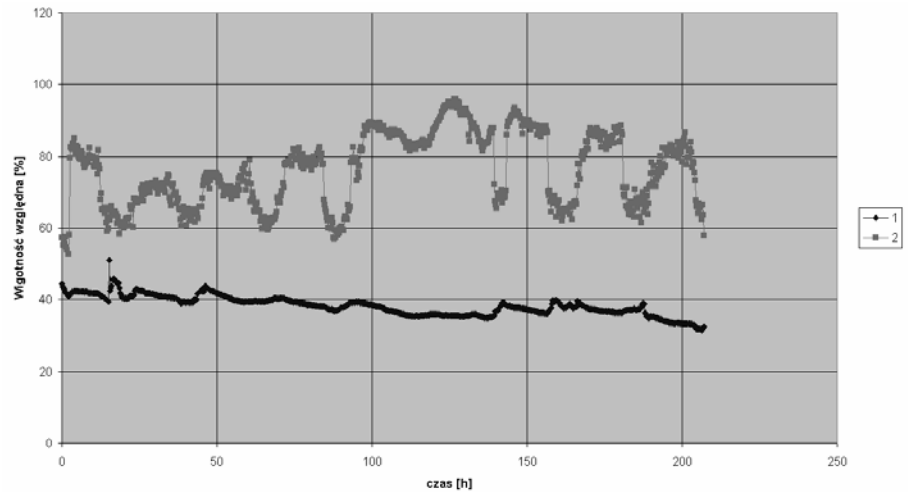
Pozwala to na obsługę przez jeden rejestrator kilku sond pomiarowych umieszczonych w różnych miejscach, np. w otworach wykonanych w konstrukcji odległych od siebie o wiele metrów. W celu umożliwienia dowolnej konfiguracji czujników wykonano rozgałęziacze systemowe. Kombinacja rozgałęziaczy i odcinków prostych przewodów połączeniowych pozwala na obsługę przez jeden rejestrator od 1 do 8 czujników umieszczonych w dowolny sposób w otworach o liczbie od 1 do 8. Maksymalna odległość między otworami wynosi 20 m.

Instalacja sondy wewnątrz konstrukcji wymaga wykonania w miejscu pomiaru otworu o średnicy 22 mm. Do otworu tego wsuwa się rurkę dystansową sondy pomiarowej z rozmieszczonymi wewnątrz czujnikami zgodnie z projektowanym położeniem punktów pomiarowych (fot. 3).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

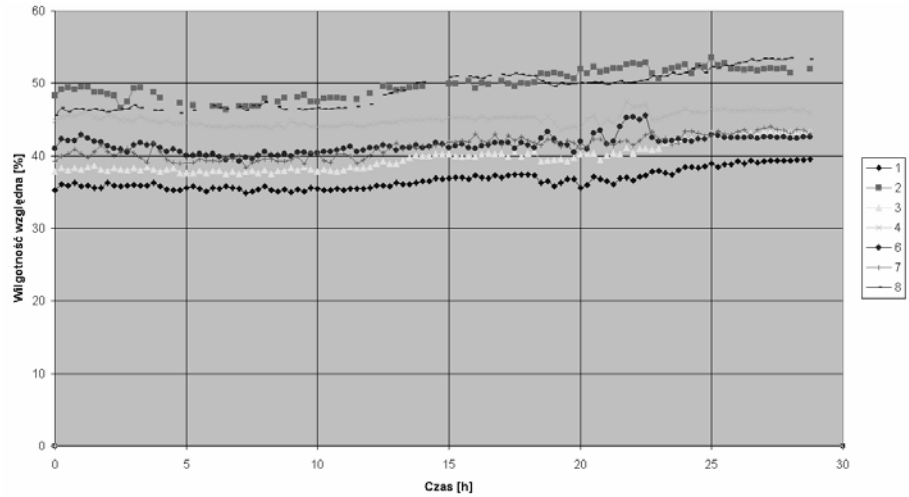
7. Badania testowe – SPW(H)

Przeprowadzone badania testowe polegały na badaniu wilgotności powietrza. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Badanie wilgotności powietrza w ciągu 200 h przez 2 czujniki. Jeden czujnik w pomieszczeniu, drugi za oknem

Fig. 7. Investigation of air humidity during 200 hours by 2 gauges. One of them is in a room, second outdoors



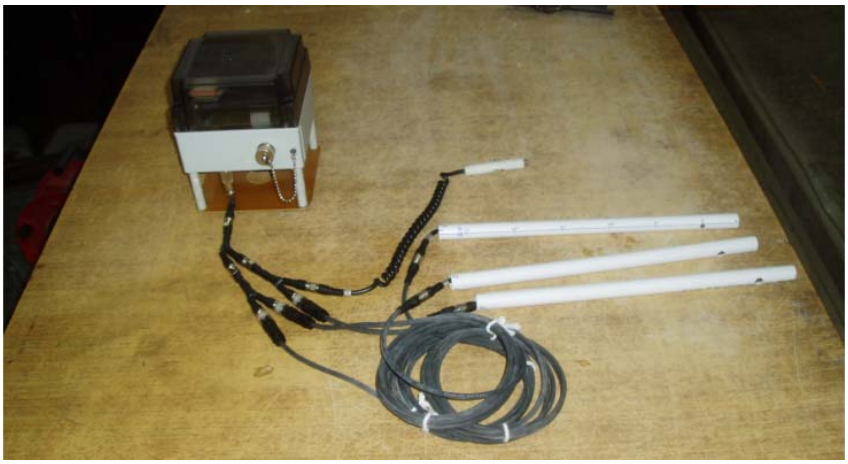
Rys. 8. Badanie wilgotności powietrza w ciągu 30 h przez 7 czujników. Czujniki rozmieszczone w różnych punktach pomieszczenia

Fig. 8. Investigation of air humidity during 30 hours by 7 gauges. The gauges in various points of a room

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

7.1. Badanie wilgotności w murku doświadczalnym we Wrocławiu

Doświadczenie zostało przygotowane przez Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na fot. 4–6.



Fot. 4. Widok modułu pomiarowego SPW(H) przygotowanego do badania i konfiguracja czujników

Photo 4. View of SPW(H) measurement module prepared to researches and gauges configuration



Fot. 5. Instalowanie czujników wewnątrz murku przeznaczonego do testów

Photo 5. Installation of gauges inside of brickwork designated to tests

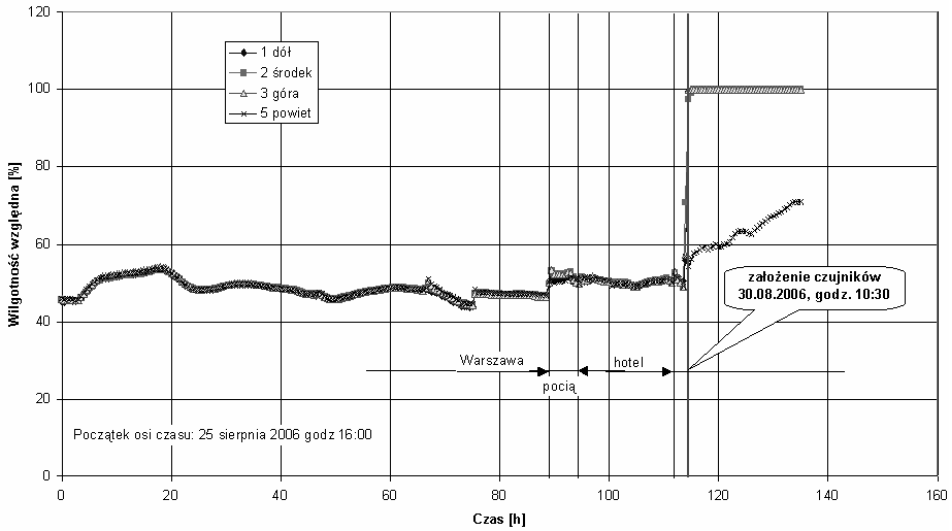
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 6. Gotowa instalacja pomiarowa systemu SPW(H)

Photo 6. The measurement installation of SPW(H) system ready to researches

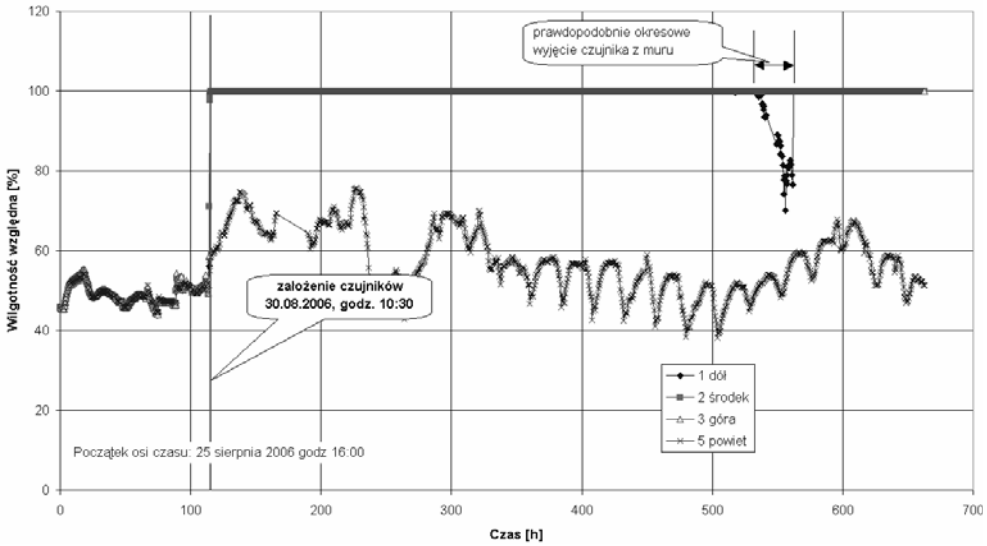
Czujniki o numerach 1, 2 i 3 zostały umieszczone wewnątrz otworów wywierconych w murze. Czujnik o numerze 4 znalazł się obok rejestratora na górze murku, a jego zadaniem jest mierzenie zmiany wilgotności wewnątrz hali laboratorium. Poniżej zamieszczono wyniki pomiarów.



Rys. 9. Wyniki pomiarów wilgotności przed zainstalowaniem czujników i po zainstalowaniu w murze pomiarowym w laboratorium Instytutu Budownictwa

Fig. 9. Results of humidity measurements before and after installation in brickwork in laboratory of Building Institute

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 10. Badanie wilgotności w murze pomiarowym i atmosferze laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wyniki odebrane drogą radiową

Fig. 10. Investigation of humidity in measurement brickwork and atmosphere of Building Institute of Wrocław Technical University. The results received in Warsaw by radio

8. Badania testowe – SPW(R)

Testowanie czujników rezystancyjnych przeprowadzano w pełnej konfiguracji, w jakiej mają docelowo pracować, czyli po zmontowaniu zgodnie z wcześniejszym opisem w sondach typu SPW(R). Widok tych sond przedstawiono na fot. 7.

Ze względu na przewidywane zastosowanie sondy typu R testowano przede wszystkim przy wysokich wilgotnościach. Przeprowadzone testy polegały na zanurzeniu sondy w wodzie w płytkim naczyniu i badaniu zmian rezystancji w miarę wysychania wody. Poniżej przedstawiono wyniki dwóch testów.

Test pierwszy przeprowadzony w sierpniu br. polegał na ułożeniu sondy w płaskim naczyniu, zalaniu jej wodą i pomiarach mierzonej rezystancji. Wyniki tego testu przedstawiono na rys. 11.

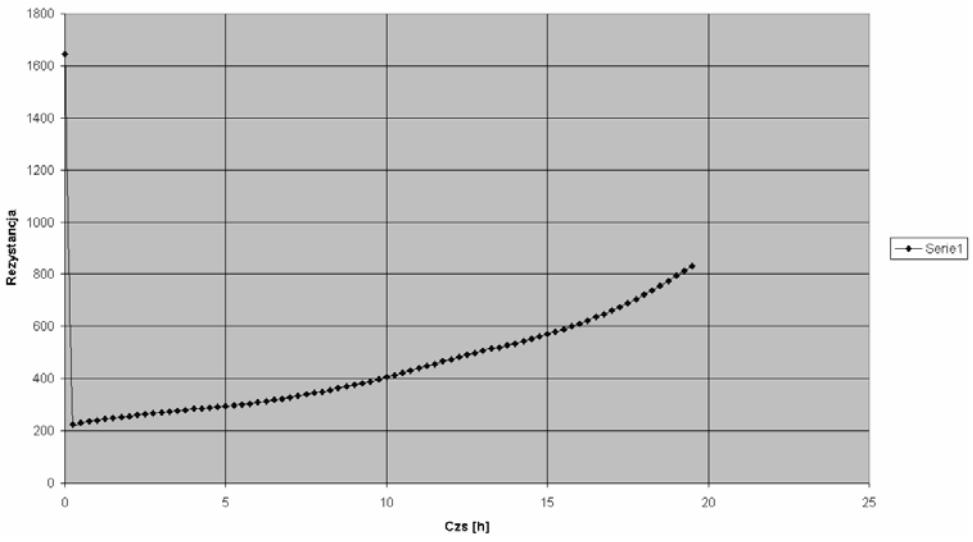
Spośród różnych testów na uwagę zasługuje test porównawczy, jaki prowadzono przez kilka tygodni dla analizy stabilności i wpływu różnych czynników na wskazania sond obu typów. W teście tym sonda typu H mierzyła stale wilgotność powietrza, natomiast dwie sondy typu R poddawano kilkakrotnie zalewaniu wodą i suszeniu w różnych warunkach. Wyniki przedstawiono na rys. 12.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 7. Ogólny widok sond pomiarowych. Licząc od dołu, widoczne są: 1) rurka osłonowa z okienkiem na blaszkę kontaktową, 2) rurka dystansowa z zamocowanym czujnikiem – widoczne blaszki kontaktowe, 3) całkowicie zestawiona sonda rezystancyjna z otwartymi okienkami, 4) sonda typu H

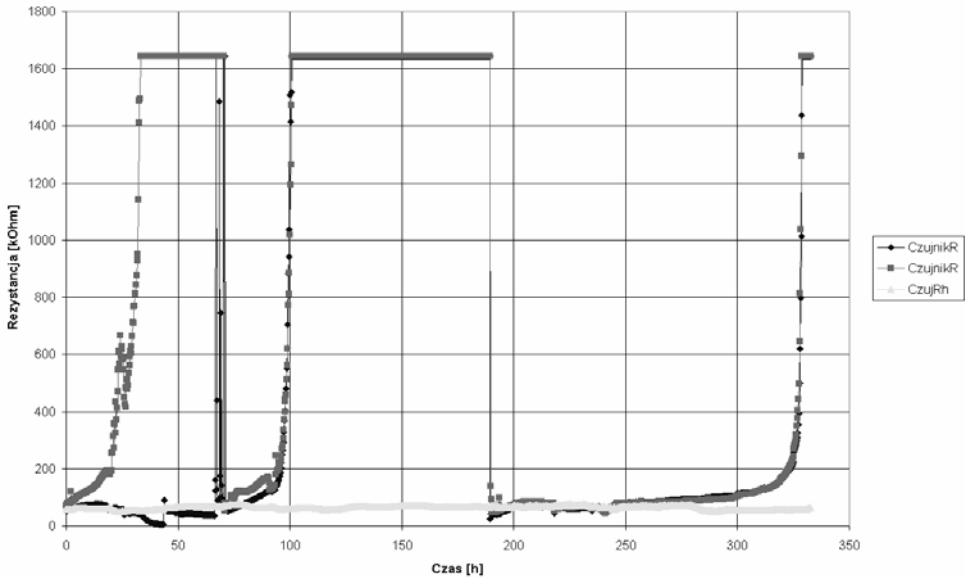
Photo 7. Total view of measurement sondes. From bottom are visible: 1) shield pipe with window for contact lamella, 2) distant pipe with gauge mounted – visible contact lamellas, 3) total assembled resistant sonde with open windows, 4) sonde of H type



Rys. 11. Test nr 1. Zalanie sondy wodą i pomiar rezystancji w trakcie wysychania

Fig. 11. Test no 1. Flooding of sonde with water and measurement of resistance during drying

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 12. Długotrwały test porównawczy różnych sond podczas zalewania i wysychania

Fig. 12. Long comparative test for various sondes during flooding with water and drying

9. Wnioski

9.1. Wnioski z przeprowadzonych badań

Przeprowadzone dotąd badania pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Kluczową sprawą jest dostosowanie typu czujnika do zadania, jakie stawia się przy pomiarach. Do pomiaru wilgotności w powietrzu zewnętrznym, jak też wilgotności w powietrzu porowym wewnątrz badanego materiału bardzo dobrze nadaje się czujnik oparty na sensorze produkcji firmy Honeywell. Sensory te stanowią podstawę dla sond typu **SPW(H)**.
2. Do pomiaru wilgotności w materiałach zawierających w porach wodę swobodną niezbędne jest stosowanie czujników rezystancyjnych i sond typu **SPW(R)**.
3. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne dla obu typów sond wydają się spełniać wszystkie wymagania. Pozwalają na dowolną konfigurację czujników i łatwy ich montaż wewnątrz badanej konstrukcji z gwarancją zachowania przewidzianego w projekcie badawczym położenia.
4. Przyjęte rozwiązania pozwalają też na dowolną konfigurację czujników obu typów i na obsługę przez jeden rejestrator wielu punktów pomiarowych położonych nawet w dużej odległości od siebie.
5. Konstrukcja rejestratora w pełni się sprawdziła. Widać jednak możliwości dalszego jego udoskonalenia przez wprowadzenie konstrukcji modularnej.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6. Niezbędne są dalsze badania i doskonalenie sond obu typów. Szczególną uwagę przy tych pracach należy położyć na doskonalenie zestyków sondy **SPW(R)** z materiałem konstrukcji.
7. Oprogramowanie spełnia obecne wymagania. Trzeba jednak przewidywać jego rozbudowę.

9.2. Przewidywane prace i perspektywy zastosowania

Zasadniczą cechą systemu **SPW** jest akwizycja informacji na placu budowy i transmisja ich do zdalnie położonej centrali, gdzie mogą być one przetwarzane, archiwizowane i udostępniane innym użytkownikom. Podstawową sprawą jest możliwość gromadzenia w jednej bazie danych informacji pochodzących z różnych systemów pomiarowych, obserwacyjnych i obliczeniowych. Dopiero wówczas uzyskuje się możliwość pogłębionych analiz i możliwość ustalania nie tylko skutków, lecz i przyczyn poszczególnych wydarzeń technologicznych. Co za tym idzie, dopiero wówczas można podejmować trafne decyzje technologiczne.

W przypadku monitorowania wilgotności w konstrukcjach budowlanych powinny być prowadzone również pomiary temperatury oraz pomiary położenia punktów pomiarowych obiektu. Realizacja tematu pozwoli na zobiektywizowanie oceny dotyczącej wilgotności konstrukcji budowlanych – uniezależnienie ich od błędów operatorskich. Uzyskane protokóły z wynikami badań będą miały walor dokumentów spełniających wymagania systemu zapewnienia jakości. Całość dokumentacji będzie tworzona w Instytucie Techniki Budowlanej. Realizacja tak rozumianego monitoringu i analiz wymaga prac pozwalających na włączenie systemu **SPW** do systemu kompleksowej metody zdalnego nadzoru **KMZN**.

Budowany automatyczny system zdalnego pomiaru wilgotności konstrukcji budowlanych znajdzie zastosowanie zarówno przy monitorowaniu obiektów wznoszonych, jak też przy monitorowaniu obiektów istniejących. Szczególne znaczenie mieć on będzie przy monitorowaniu zmian wilgotności w obiektach poddawanych operacjom osuszania. Dotyczy to również obiektów i konstrukcji zabytkowych położonych w trudno dostępnych miejscach, gdzie niemożliwe jest umieszczenie na stałe personelu dokonującego odczytów. Przykładem takiego obiektu o wyjątkowym znaczeniu dla historii Polski jest Cmentarz Orląt Lwowskich. Prowadzone na jego terenie prace renowacyjne uzależnione są od postępu w osuszaniu terenu i elementów architektury cmentarnej. Niektóre prace możliwe są do wykonania dopiero po osuszeniu obiektów, a przedwczesne zamknięcie wody w porach materiału może mieć znaczenie destrukcyjne. Konstrukcja systemu **SPW** umożliwia monitorowanie skuteczności prac osuszających przez granice państwa.

Wdrożenie systemu **SPW** pozwoli na realizację wielu zleceń związanych z nadzorem nad renowacją obiektów istniejących niezależnie od ich położenia na terenie kraju. Pozwoli więc na wsparcie i wdrożenie systemu jakości na tych budowach nawet w przypadku małych firm wykonawczych pracujących dotąd bez wsparcia ze strony zaplecza naukowo-badawczego. Ustrzeże wykonawców od często popełnianych błędów w wykonawstwie i tym samym przyczyni się nie tylko do podniesienia jakości, lecz również do obniżenia kosztów. Niezależnie od tego system **SPW** będzie użyteczny przy budowie nowych obiektów, bowiem względy wilgotnościowe odgrywają na tyle istotną rolę, że konieczna jest obserwacja zmian wilgotności.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

10. Zakończenie

Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych jest niezbędne dla zapewnienia jakości w czasie wykonywania obiektu i zapewnienia bezpieczeństwa w czasie jego użytkowania. Obecne możliwości płynące z postępu w elektronice, technice pomiarowej i informatyce stwarzają możliwość monitorowania dowolnych obiektów położonych w dowolnym miejscu i w trybie online. W istocie likwiduje to wszelkie bariery, na jakie natrafiała ocena obiektu wynikające z czasu i przestrzeni. Budowany w ITB system zarządzania jakością pozwoli na podniesienie jakości w budownictwie i zwiększenie bezpieczeństwa obiektów eksploatowanych. Umożliwi standaryzację trybu nadzoru – nawet najmniejsze firmy będą mogły korzystać z całej wiedzy dostępnej dzięki najnowszym osiągnięciom.

W wyniku przeprowadzonych prac skonstruowano jeden system pomiarowy korzystający z dwóch typów czujników H i R. Integracja obu typów czujników pozwala na monitorowanie zmian wilgotności w dowolnym wewnętrznym punkcie konstrukcji niezależnie od jej położenia na terenie całego kraju. Monitoring może być prowadzony w każdych warunkach i w pełnym zakresie dla każdego materiału. Pamiętać jednak trzeba, że rodzaj czujnika każdorazowo musi być dostosowany do przewidywanego zakresu wilgotności. Ponadto dla każdego rodzaju materiału przy wprowadzeniu czujników rezystancyjnych niezbędne jest przeprowadzenie cechowania materiału, tj. ustalenie zależności między wilgotnością a rezystancją materiału.

Literatura

[1] Witakowski P., *Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji*, XIX Konferencja Naukowa – Korbielów '2007 nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych", Korbielów, marzec 2007.

[2] Witakowski P., *Internetowy system zarządzania jakością w budownictwie betonowym*, materiały konferencyjne III Konferencji nt. „DNI BETONU – tradycja i nowoczesność", Wisła, październik 2004.

[3] Witakowski P., *Informatyzacja procesów pomiarowych jako warunek kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Wprowadzenie*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 2005.

[4] Witakowski P., *Internetowy monitoring wznoszonych i eksploatowanych obiektów betonowych*, XX Konferencja Naukowo-Techniczna JADWISIN '2006 nt. „Beton i Prefabrykacja", Serock, maj 2006.

[5] Witakowski P., *Koncepcja centrum usług zarządzania jakością w budownictwie betonowym*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 2005.

[6] Witakowski P., *Skomputeryzowane urządzenie do badania narastania wytrzymałości*, Inżynieria i Budownictwo 10/1993.

[7] Łykow A.W., *Tiepło i massoobmien w procesach suszki*, Moskwa 1956.

[8] Krischer O., *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trockungstechnik*, Springer, Berlin–(Göttingen)–Heidelberg 1962.

[9] Cammerer J.S., *Izolacje ciepłochronne w przemyśle*, Arkady, Warszawa 1967.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[10] B o g o s ł o w s k i W.N., *Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach*, Arkady, Warszawa 1985.
[11] W i t a k o w s k i P., *Matematyczno-fizyczny model sprzężonego przepływu ciepła i wilgoci w przegrodach budowlanych*, Procesy wymiany ciepła i masy w przegrodach budowlanych, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ