

TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE BADANIA CIEPLNYCH WŁAŚCIWOŚCI GRZEJNIKA PODŁOGOWEGO W WARUNKACH NIEUSTALONYCH.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMAL SPECIFICITY OF FLOOR RADIATOR IN THERMAL DYNAMICS.

Marian Rosiński, Zenon Spik

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa
e-mail: marian_rosinski@is.pw.edu.pl, zenon_spik@is.pw.edu.pl

ABSTRACT

The paper presents results of research of pilot floor heaters in article in conditions of unestablished heat exchange. It present function of answer of floor heater as object identification inertion unit with delay. It compare results achieved in recapitulation for simulation experiments.

Keywords: floor radiator, heat exchange, research, heat characteristic, regulation.

1. Wstęp

Ogrzewania podłogowe są tzw. ogrzewaniami niskotemperaturowymi, przy czym pojęcie to odnosi się zarówno do temperatury powierzchni grzejnika, jak i temperatury czynnika zasilającego układ ogrzewczy.

Mała wartość temperatury powierzchni grzejnej, wynosząca najczęściej $23 \div 26^{\circ}\text{C}$, ma z kolei korzystny wpływ na właściwy komfort cieplny i jakość powietrza w ogrzewanych pomieszczeniach. Istotne jest także to, że przy tej temperaturze powierzchni grzejnika podłogowego i jego budowie występuje wyraźne redukcowanie negatywnych czynników oddziałujących na wewnętrzne środowisko ogrzewanych pomieszczeń. Ogrzewanie podłogowe charakteryzuje się tym, że do pomieszczenia przekazywany jest znacznie większy udział ciepła przez promieniowanie (około 70%), a tylko 30% przez konwekcję (Staniszewski, 1980). Taki charakter przekazywania ciepła powoduje to, że w stosunku do ogrzewań tradycyjnych uzyskuje się wyższą temperaturę przegród budowlanych i innych ciał stałych znajdujących się w ogrzewanym pomieszczeniu (Spik, 2007). To z kolei pozwala, przy zachowaniu porównywalnego komfortu cieplnego, na obniżenie średniej temperatury w pomieszczeniach o ok. $1 \div 2\text{K}$. Niższa temperatura powietrza w pomieszczeniach prowadzi do obniżenia strat ciepła drogą przenikania przez zewnętrzne przegrody budowlane, a także, przy zachowaniu tej samej

wartości strumienia powietrza wentylacyjnego, powoduje obniżenie zapotrzebowania na ciepło do ogrzania powietrza w granicach od 3 do 7% (Rosiński, Spik, 2005, 2008).

Niższa temperatura powietrza w pomieszczeniu ma także istotny aspekt higieniczny, ponieważ przy temperaturze powietrza powyżej $22 \div 24^{\circ}\text{C}$ znacząco wzrasta ryzyko podrażnienia błony śluzowej. Przy ogrzewaniu podłogowym dobre warunki higieniczne wynikają także z tego, że maksymalna temperatura powierzchni podłogi wynosi $29 \div 35^{\circ}\text{C}$ i jest znacznie niższa niż temperatura powierzchni tradycyjnych grzejników konwekcyjnych. W porównaniu zatem z grzejnikami konwekcyjnymi, w przypadku grzejnych podłóg występuje mniejsza cyrkulacja powietrza, a w konsekwencji także mniejsza ilość unoszonego kurzu. Równocześnie nie występuje tzw. zjawisko „przypiekania kurzu” na powierzchni grzejnika, które ma miejsce dopiero wówczas, gdy osiąga on temperaturę wynoszącą 55°C . Przypieczone cząstki kurzu są większe i bardziej drażniące, co w konsekwencji wywołuje wzrost reakcji alergicznych. Na grzejnikach podłogowych nie występuje także zjawisko jonizacji powietrza, które występuje wyłącznie przy kontakcie powietrza z metalowymi powierzchniami grzejników. W procesie jonizacji powietrza powstaje przewaga jonów dodatnich nad ujemnymi, co z kolei jest przyczyną wywoływania duszności i suchości dróg oddechowych u ludzi przebywających w ogrzewanych pomieszczeniach.

Te zalety ogrzewania podłogowego, szczególnie w aspekcie higienicznym i ekonomicznym (mniejsze zużycie energii) przyczyniły się do tego, że od kilkudziesięciu lat jest ono powszechnie stosowane w krajach Europy Zachodniej i Skandynawii. Coraz powszechniej ogrzewanie to stosuje się także w Polsce. Może być stosowane jako ogrzewanie pomieszczeń w budynkach jednorodzinnych i wielorodzinnych, w pomieszczeniach biurowych oraz obiektach: sakralnych, przemysłowych, zabytkowych, sportowych, a także jako podgrzewanie tarasów, dachów, podjazdów itd. (Kowalczyk, Rosiński, 2007).

Niska temperatura nośnika ciepła umożliwia z kolei współpracę ogrzewania podłogowego w układzie szeregowo – równoległym z instalacjami tradycyjnymi (o wyższej temperaturze). Ponadto ogrzewania podłogowe mogą być zasilane w ciepło z nowoczesnych i ekologicznych źródeł energii, takich jak: pompy ciepła, kondensacyjne kotły gazowe czy kolektory słoneczne (Kowalczyk, 2004)..

2. Wyniki badań eksperymentalnych grzejnika podłogowego.

Stanowisko badawczo-pomiarowe wykorzystane w czasie badań zlokalizowane jest w sali 225 gmachu Wydziału Inżynierii

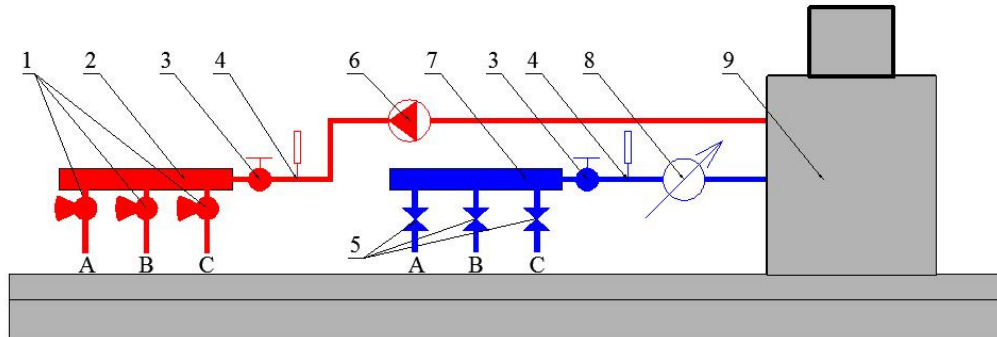
Środowiska Politechniki Warszawskiej. Składa się ono z następujących elementów (rys. 1):

1. zawory termostaticzne zainstalowane na zasileniu każdego z obiegów (głowica termostaticzna zdemontowana na okres prowadzenia badań),
2. rozdzielacz zasilający trzy obiegi grzejne, umieszczony w szafce natynkowej,
3. kulowe zawory odcinające,
4. para czujników zanurzeniowych Pt 500,
5. zawory powrotne z nastawą wstępną zainstalowane na powrocie każdego z obiegów.
6. pompa obiegowa typu Wilo-Star_E 25/2 firmy Wilo,
7. rozdzielacz powrotny na trzy obiegi, umieszczony w szafce natynkowej,
8. jednostrumieniowy przepływomierz wirnikowy z magnetycznym odczytem impulsów typu EEM-VS firmy Danfoss o $Q_n=0,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_t=0,048\text{m}^3/\text{h}$, DN15, sygnał wyjściowy 166,8 imp./l,
9. źródło ciepła – ultratermostat typu U10, produkcja NRD,

A – grzejnik podłogowy o rozstawie rur B = 15 cm wykonany w systemie PURMO,

B – grzejnik podłogowy o rozstawie rur B = 20 cm wykonany w systemie PURMO,

C – grzejnik podłogowy o rozstawie rur B = 20 cm wykonany w systemie PURMO.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe – układ hydrauliczny. Źródło: opracowanie własne.

W czasie pomiarów rejestrowane były takie parametry pracy układu jak:

1. temperatura zasilania czynnika grzejnego,
2. temperatura powrotu czynnika grzejnego,
3. średnia temperatura powierzchni grzejnika podłogowego,
4. temperatura powietrza wewnętrznego,
5. temperatura powietrza zewnętrznego,
6. strumień objętości czynnika grzejnego.

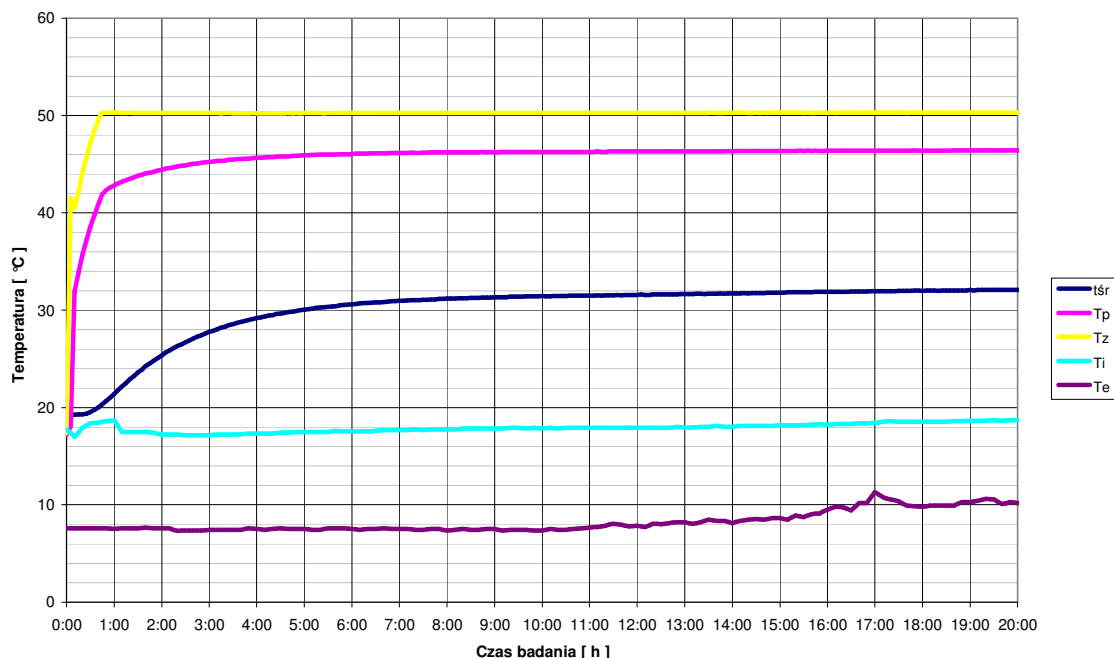
W celu określenia charakterystyk dynamicznych grzejnika podłogowego zastosowano szereg wymuszeń cieplnych i hydraulicznych. W czasie badań zastosowano wymuszenia w postaci:

1. włączenia grzejnika podłogowego,
2. wyłączenia grzejnika podłogowego,
3. skokowego podniesienia temperatury czynnika grzejnego,

4. skokowego obniżenia temperatury czynnika grzejnego,
5. skokowego zwiększenia strumienia masy czynnika grzejnego,
6. skokowego obniżenia strumienia masy czynnika grzejnego,
7. Wymuszenie za pomocą skokowej zmiany temperatury powietrza w pomieszczeniu.

Przykładowe badanie przy wymuszeniu w postaci włączenia grzejnika przedstawiono na rysunku nr 2 (Spik, 2009). Badanie polegało na włączeniu przepływu wody w węzownicy badanego grzejnika. Omówiona seria pomiarowa wykonana została w dniu 19

kwietnia 2008 r. Układ znajdował się w stanie równowagi cieplnej z otoczeniem (temperatura powierzchni podłogi równa była temperaturze powietrza w pomieszczeniu). W chwili początkowej włączono przepływ wody w grzejniku. Zadana temperatura zasilania grzejnika wynosiła 50,5°C. Zadany strumień objętości wody wynosił 0,045l/s. Temperatura wody powracającej z grzejnika podłogowego ustaliła się na poziomie 47,2°C. Średnia temperatura powietrza w pomieszczeniu w trakcie badania wynosiła 18,3°C. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg uśrednionej wartości temperatury podłogi.



Rys. 2. Rozgrzewanie grzejnika podłogowego – uśredniona temperatura powierzchni. Źródło: opracowanie własne.

3. Porównanie wyników badań teoretycznych i eksperymentalnych.

W układach automatycznej regulacji grzejnika podłogowego stosowane są regulatory, do których wykorzystuje się różnego rodzaju algorytmy regulacji. Najlepsze wyniki regulacji osiągane są w przypadku, gdy znana jest odpowiedź obiektu regulacji na zastosowane wymuszenie.

W tym celu obiekt sterowania (grzejnik podłogowy) poddać należy identyfikacji. W opisie automatycznej regulacji stosuje się wiele metod identyfikacji obiektów sterowania. Wyróżnia się przy tym metody teoretyczne oraz metody numeryczne (Niemyjski, 2000).

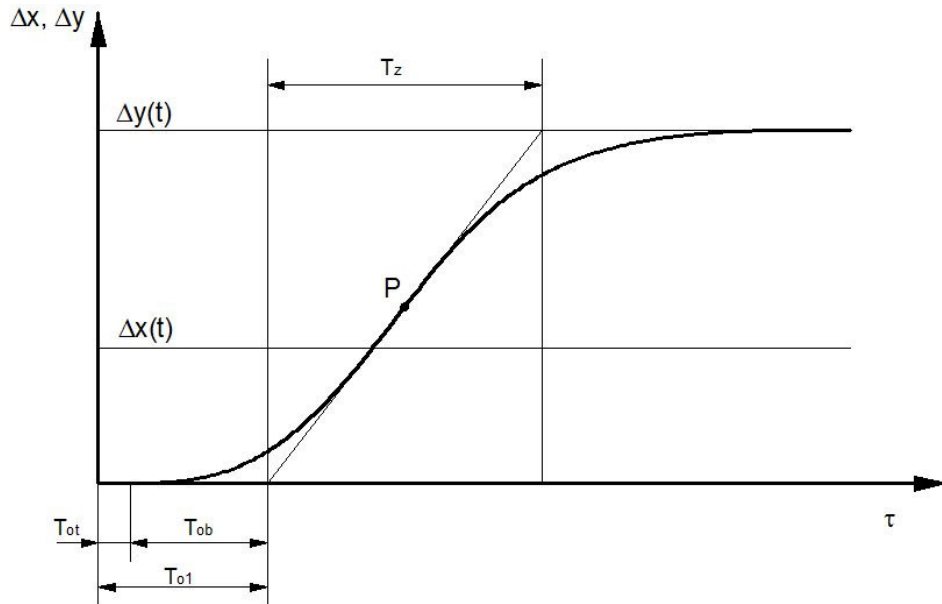
Opis matematyczny ciągłego elementu automatyki składa się z dwóch części:

1. Równania lub wykresu charakterystyki statycznej, określających zależność wyjścia od wejścia w stanach ustalonych,
 2. Równania różniczkowego lub operatorowego, opisującego właściwości statyczne i dynamiczne w otoczeniu wybranego na charakterystyce statycznej punktu pracy.
- Wymagania punktu pierwszego opisane zostały szczegółowo w literaturze. Podano tam właściwości statyczne badanego obiektu, którym jest grzejnik podłogowy oraz omówiono metody konstruowania charakterystyk statycznych grzejnika.

Realizacja punktu drugiego, ze względu na skomplikowaną postać równań różniczkowych opisujących przekazywanie ciepła w tym układzie, wymaga – dla rozwiązania problemu – przeprowadzenia złożonej analizy.

Z wymienionych powyżej powodów opisywanie zjawisk nieustalanej wymiany ciepła za pomocą klasycznych równań

różniczkowych jest nieefektywne i czasochłonne. Na podstawie badań fizykalnych przybliżyć można badany układ za pomocą członu inercyjnego II rzędu z opóźnieniem (Spik, 2009). Przebieg funkcji odpowiedzi na zadane wymuszenie dla członu inercyjnego z opóźnieniem wraz z podstawowymi parametrami zilustrowano na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyka skokowa modelu inercyjnego z opóźnieniem..

Wyznaczony na rysunku czas T_{o1} jest czasem opóźnienia układu na zadane wymuszenie $\Delta x(t)$. Opóźnienie to składa się z czasu opóźnienia transportowego T_{ot} oraz czasu opóźnienia bezwładnościowego T_{ob} . W analizie tej nie zachodzi potrzeba różnicowania obu rodzajów opóźnień i w opisie używany będzie całkowity czas opóźnienia T_{o1} (Chmielnicki, Kasperkiewicz, Zawada, 1978).

Charakterystyka przedstawiona na rysunkach 3 oraz 4 opracowana została w oparciu o transmitancję operatorową opisaną wyrażeniem:

$$G(s) = \frac{k}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)} \cdot e^{-T_{o1} \cdot s} \quad (1)$$

gdzie:

k – stała wzmocnienia układu,

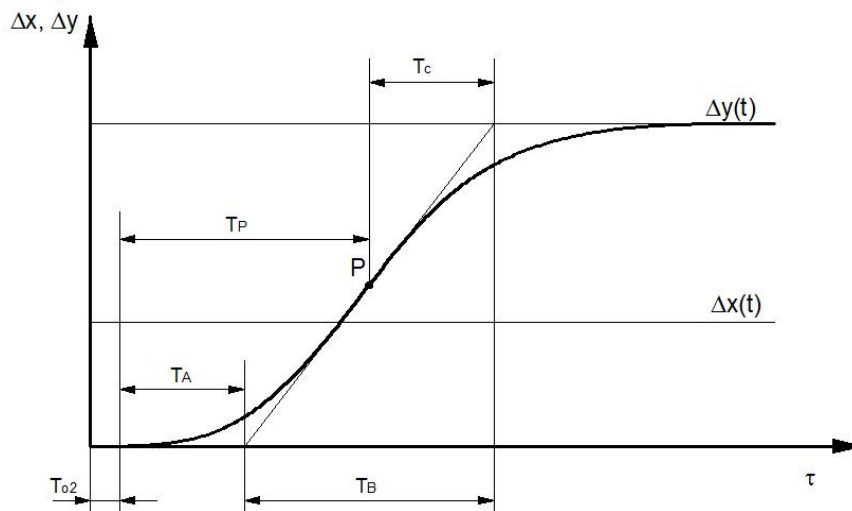
T_1, T_2 – stałe czasowe układu wyznaczone w sposób analityczny lub doświadczalny, [s]

T_{o1} – stała opóźnienia układu, [s].

Stałą czasową układu wyznaczyć można natomiast za pomocą następującej zależności:

$$k = \frac{\Delta y_{st}}{\Delta x_{st}} \quad (2)$$

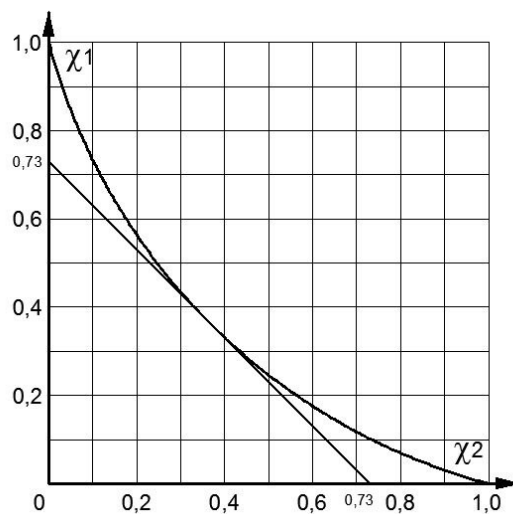
W celu opisu właściwości dynamicznych badanego obiektu wprowadza się dodatkowe wielkości pomocnicze T_B oraz T_C . Sposób odczytywania parametrów pomocniczych zilustrowano na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyka skokowa obiektu statycznego i jej charakterystyczne parametry..

Korzystając z wykresu Oldenburga i Sartoriusa (rysunek 5), określić można stałe czasowe niezbędne do obliczenia odpowiedzi układu,

wyrażonego za pomocą transmitancji operatorowej opisanej wzorem 1.



Rys. 5. Wykres Oldenburga i Sartoriusa.

Przekształcając wzór 1, otrzymuje się funkcję odpowiedzi układu:

$$h(\tau) = k \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{\tau - T_o}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{\tau - T_o}{T_2}} \right) \cdot 1(\tau) \quad (3)$$

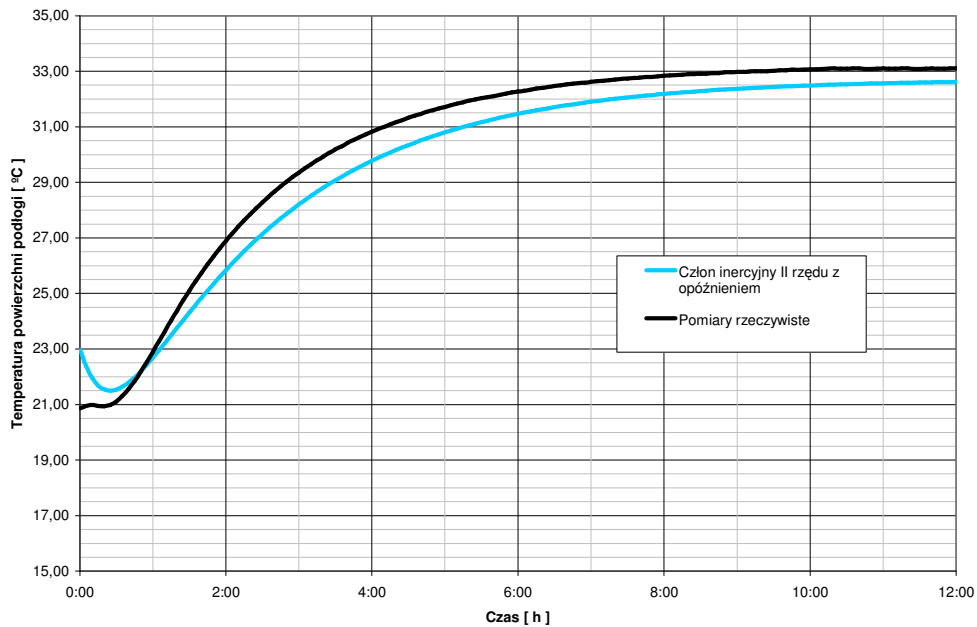
gdzie:
oznaczenia jak wyżej.

Metoda identyfikacji grzejnika podłogowego jako obiektu sterowania pozwala na proste określenie dynamicznych właściwości cieplnych grzejnika. Funkcja odpowiedzi opisana równaniem (3) pozwala na bezpośrednie wyznaczenie wartości temperatury powierzchni grzejnika podłogowego.

W przedstawionej metodzie największą trudność sprawia poprawne określenie stałych czasowych. Ich wartości są charakterystyczne dla danego typu grzejnika i zależą od jego konstrukcji geometrycznej oraz materiałów użytych do budowy, natomiast nie zależą od zaprojektowanych parametrów czynnika grzejącego.

Układy automatycznej regulacji wyposażone mogą być w funkcję identyfikacji poszczególnych parametrów układu. Zatem powtórzony wielokrotnie proces zmian dynamicznych parametrów cieplnych sterowanego układu pozwoli na określenie stałych czasowych grzejnika.

Na podstawie znanych przebiegów odpowiedzi cieplnej grzejnika podłogowego określono stałe czasowe układu. Otrzymane w ten sposób charakterystyki wykazują wysoką zbieżność z wynikami pomiarów empirycznych wykonanych w skali półtechnicznej.



Rys. 6. Porównanie przebiegu temperatury powierzchni grzejnika podłogowego obliczone różnymi metodami przy włączeniu grzejnika podłogowego. Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 1. Różnice czasu osiągnięcia poszczególnych poziomów zmiany temperatury podłogi w odniesieniu do pomiarów eksperymentalnych, przy włączeniu grzejnika podłogowego. Źródło: opracowanie własne.

Zakres temperatury	Człon inercyjny II rzędu z opóźnieniem
-	%
10%	0,7%
62,5%	2,5%
90%	5,2%
95%	7,0%

Jak wynika z zestawionych powyżej danych, za pomocą przedstawionej metody osiągnięto wyniki charakteryzujące się wysoką zbieżnością z wynikami osiągniętymi drogą empiryczną. Maksymalne odchylenie wartości temperatury powierzchni podłogi w stosunku do wyników osiągniętych w pomiarach wykonanych na stanowisku doświadczalnym nie przekroczyły wartości 1,15 K. Różnice wartości temperatury powierzchni podłogi grzejnika w końcowym stanie ustalonym nie przekraczały wartości 0,4 K.

Zawarte w tabeli 1. wartości odchyżeń czasów osiągania poszczególnych poziomów zmiany temperatury, obliczone za pomocą równania charakterystycznego członu inercyjnego II rzędu z opóźnieniem, symulującego to samo wymuszenie, pozwoliło na osiągnięcie poszczególnych poziomów temperatury z dokładnością na poziomie 7%.

4. Podsumowanie i wnioski

Z przedstawionych w referacie danych wynika, że pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych oraz wynikami badań teoretycznych, dotyczących zarówno temperatury powierzchni wymiany ciepła grzejnika podłogowego, jak i odchyżeń czasów osiągnięcia poszczególnych poziomów zmiany temperatury, osiągnięto dużą dokładność.

Badania cieplne grzejnika podłogowego charakteryzują się tym, że różnica temperatury pomiędzy powierzchnią grzejnika, a średnią temperaturą omywającego grzejnik powietrza jest mała, przy czym maksymalnie wynosi około 12K. Stąd wymagana jest wysoka stabilizacja parametrów powietrza w czasie wykonywania badań, ponieważ w innym przypadku może to powodować powstawanie znaczących błędów związanych z mocą przekazywaną przez grzejnik.

Wnioski:

1. Przedstawione w referacie równanie charakterystyki dynamicznej grzejnika, oparte na opisie członu inercyjnego II rzędu z opóźnieniem może być zaimplementowane do sterowania mocą cieplną grzejników podłogowych.
2. Najlepsze wyniki uzyskuje się przy sterowaniu wydajnością grzejnika za pomocą regulacji jakościowej.

LITERATURA

CHMIELNICKI W., KASPERKIEWICZ K., ZAWADA B.: *Laboratorium automatyzacji urządzeń sanitarnych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1978

KOWALCZYK A.: *Wybór i weryfikacja metody wymiarowania ogrzewań podłogowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2004.

KOWALCZYK A., ROSIŃSKI M.: *Comparative analysis of the european metod for dimensioning of massive floor radiators with empirically verified reference numerical method*, Archives of Civi Engineering, str. 357-386, luty 2007.

NIEMYJSKI O.: *Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2000.

PURMO: *Ogrzewanie podłogowe – pomoce projektanta*, Firma Rettig Heating Sp. z o.o., Warszawa 2002.

ROSIŃSKI M., SPIK Z.: *Ocena możliwości regulacji grzejnika podłogowego w warunkach dynamicznej pracy*, XI International Conference Air Conditioning Protection & District Heating, Szklarska Poręba, czerwiec 2005r.,

ROSIŃSKI M., SPIK Z.: *Wpływ obniżenia mocy cieplnej grzejnika podłogowego na jakość parametrów powietrza w okresie osłabienia ogrzewania pomieszczenia*, XI International Conference Air Conditioning Protection & District Heating, Szklarska Poręba, czerwiec 2008.

SPIK Z.: *Ogrzewanie podłogowe w hali basenu za, czy przeciw*, VI Sympozjum Naukowo - Techniczne Instalacje Basenowe, Zakopane – Kościelisko, luty 2007.

SPIK Z.: *Ciepłne właściwości dynamiczne grzejnika podłogowego*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2009.

STANISZEWSKI B.: *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa 1980.