

# **Metoda energooszczędnego sterowania pracą instalacji grzewczych w budynkach o podwyższonej izolacyjności cieplnej – porównanie modelu matematycznego z wynikami badań**

*Maja Dyczkowska, Aleksander Szkarowski  
Politechnika Koszalińska*

## **1. Wstęp**

Celem pracy jest analiza porównawcza wyników obliczeń wykonanych na podstawie modelu matematycznego z wynikami eksperymentalnymi, wykonanymi dla tego samego obiektu. W badanym budynku zastosowano metodę sterowania czasem pracy węzła cieplnego w celu zmniejszenia zużycia energii cieplnej na cele grzewcze.

W celu uzyskania dodatkowej oszczędności w zużyciu energii cieplnej można zastosować regulację instalacji centralnego ogrzewania. Powszechne jest użycie regulacji pogodowej, czyli uzależnienie pracy kotła lub węzła cieplnego od zmian temperatury powietrza zewnętrznego. Jednakże można pójść dalej, spróbować dostosować pobór ciepła do stopnia wykorzystania obiektu w różnych porach doby. Nieuzasadnione jest, bowiem utrzymanie stale takiej samej temperatury, zwłaszcza w nocy i w dni wolne od pracy. Ten kierunek badań wymaga tworzenia modeli matematycznych niezbędnych do symulacji i optymalizacji procesów cieplnych badanych obiektów.

Do osiągnięcia wysokiej jakości energetycznej budynku niezbędne jest, oprócz termomodernizacji budynku, zachowanie odpowiednich warunków klimatycznych wewnątrz pomieszczeń ogrzewanych. Pojawia się, więc problem sterowania warunkami komfortu cieplnego w zależności od temperatury zewnętrznej.

Obiekty o wysokiej izolacyjności cieplnej, wznoszone w technologii tradycyjnej, mają dużą bezwładność cieplną, dzięki temu w momencie wyłączenia zasilania w energię cieplną wolno się wychładzają, zaś stosunkowo szybko nagrzewają się. W ten sposób uzyskujemy oszczędność, gdyż przegrody budowlane akumulują ciepło.

Istotą optymalnej regulacji temperatury, jest takie sterowanie dostawą energii cieplnej do pomieszczeń, by w określonym czasie uzyskać odpowiednią temperaturę powietrza wewnętrznego. Skoro zaś mamy pomieszczenia, w których nie ma potrzeby utrzymywania przez cały czas stałej, wysokiej temperatury, możemy ją celowo w sposób zaplanowany obniżać, ale nie poniżej wartości, przy której mogłoby nastąpić wykraplanie się wilgoci na powierzchni i wewnątrz przegrody budowlanej.

## 2. Model matematyczny regulacji c.o.

Przedmiotem obliczeń jest wyznaczenie przebiegu zmian temperatury wewnętrznej w badanym budynku, w którym zastosowano dwustopniową regulację czasem pracy węzła cieplnego. Celem pracy jest określenie wartości najniższej osiągalnej temperatury wewnątrz obiektu oraz szybkości powrotu tej temperatury do wartości początkowej od momentu etapu schładzania.

W pierwszej kolejności określono jednostkowe straty ciepła budynku. Jednostkowe straty ciepła budynku (jako objętościowa gęstość strumienia ciepła przenikająca poprzez przegrody budowlane)  $q$ ,  $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$ , dla  $1 m^3$  jego zewnętrznej objętości wyznaczono według wzoru prof. N.S. Jermołajewa [2]:

$$q = 1,06 \frac{P}{S} [k_{\acute{s}c.} + d(k_{ok.} - k_{\acute{s}c.})] + \frac{1}{H} (n_g k_g + n_d k_d), \quad (1)$$

w którym:

$P$  – obwód zewnętrzny budynku, m,

$S$  – powierzchnia rzutu parteru budynku,  $m^2$

$k_{\acute{s}c.}$ ,  $k_{ok.}$ ,  $k_g$ ,  $k_d$  – współczynniki przenikania ciepła dla: ścian zewnętrznych, okien, stropu górnego (nad ostatnią kondygnacją) i stropu dolnego (nad piwnicą),

$d$  – udział powierzchni przeszklonych,

$H$  – wysokość budynku, m,

$n_g$ ,  $n_d$  – współczynniki uwzględniające zmniejszenie obliczeniowej różnicy temperatur dla stropu górnego i dolnego względem ścian.

Współczynnik 1,06 we wzorze (1) uwzględnia dodatkowe straty ciepła związane z różną orientacją powierzchni zewnętrznych.

Iloczyny określające we wzorze (1) straty ciepła poprzez stropy można przy braku danych orientacyjnie przyjmować:

$$n_g k_g = 0,7 k_{sc.};$$

$$n_d k_d = 0,3 k_{sc.}$$

Następnym krokiem w toku obliczeń jest określenie stałej czasowej współczynnika akumulacyjności cieplnej budynku. Stała czasowa charakteryzuje ogólną zdolność konstrukcji budynku do akumulacji ciepła i łagodzenia wahań temperatury w pomieszczeniach ogrzewanych. Wartość tej stałej  $T$ , h, określono ze wzoru:

$$T = \sum \frac{F \cdot c_{sc.}}{3,6qV}, \quad (2)$$

w którym:

$F$  – powierzchnia ścian budynku lub oddzielnych ich części (za wyjątkiem przeszklenia),  $m^2$ ,

$$F = P \cdot H(1 - d) \quad (3)$$

$V$  – objętość zewnętrzna budynku lub oddzielnych jego części,  $m^3$ :

$$V = S \cdot H \quad (4)$$

$c_{sc.}$  – zredukowana (jednostkowa powierzchniowa) pojemność cieplna ścian lub oddzielnych ich części,  $kJ/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , którą dla ściany składającej się z  $n$  warstw określono według wzoru:

$$c_{sc.} = \sum_{i=1}^n c_i \rho_i \delta_i \quad (5)$$

gdzie:

$c_i; \rho_i; \delta_i$  – masowa pojemność cieplna,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ , gęstość,  $kg/m^3$ , i grubość, m, dla poszczególnych warstw ściany.

Kolejnym zagadnieniem było opracowanie metody określenia temperatury powietrza w pomieszczeniach ogrzewanych.

Temperaturę powietrza podczas jego schładzania określamy ze wzoru [2]:

$$t_{p.w.}^{sch.} = \left( t_{p.w.}^{p.sch.} - t_{p.z.} \right) \left( J_{sch.} + \frac{1 - J_{sch.}}{e^{\frac{z_{sch.}}{\beta_{sch.}}}} \right) + t_{p.z.}, \quad (6)$$

w którym:

$t_{p.w.}^{p.sch.}$  – temperatura powietrza wewnętrznego na początku etapu schładzania;

$J_{sch.}$  – względna moc cieplna instalacji c.o. w etapie schłodzenia. Przy całkowitym wyłączeniu instalacji, czyli przy  $J_{sch.} = 0$ , mamy:

$$t_{p.w.}^{sch.} = \left( t_{p.w.}^{pocz.} - t_{p.z.} \right) \frac{1}{e^{\beta_{sch.}}} + t_{p.z.}; \quad (7)$$

$z_{sch.}$  – liczba godzin, która minęła od początku stadium schładzania;

$\beta_{sch.}$  – współczynnik akumulacyjności cieplnej budynku podczas schładzania według wzoru:

$$\beta_{sch.} = a_{sch.} T, \quad (8)$$

gdzie:

$T$  – stała czasowa współczynnika akumulacyjności cieplnej budynku;

$a_{sch.}$  – współczynnik uwzględniający bieżący faktor czasu, który w stadium schładzania określamy ze wzoru:

$$a_{sch.} = 0,6 + 0,8e^{-\frac{1,5}{z_{sch.}}} \quad (9)$$

Temperaturę powietrza podczas etapu nagrzewania określa się ze wzoru [2]:

$$t_{p.w.}^{nag.} = \left( t_{p.w.}^{p.nag.} - t_{p.z.} \right) \left( x + \frac{1-x}{e^{\beta_{nag.}}} \right) + t_{p.z.}, \quad (10)$$

w którym:

$t_{p.w.}^{p.nag.}$  – temperatura powietrza wewnętrznego na początku etapu nagrzewania;

$z_{nag.}$  – liczba godzin, która minęła od początku stadium nagrzewania;

$\beta_{nag.}$  – współczynnik akumulacyjności cieplnej budynku w etapie nagrzewania według wzoru:

$$\beta_{nag.} = a_{nag.} T, \quad (11)$$

gdzie:

$T$  – stała czasowa współczynnika akumulacyjności cieplnej budynku;

$a_{nag.}$  – współczynnik uwzględniający bieżący faktor czasu, który w stadium nagrzewania określamy ze wzoru:

$$a_{nag.} = 0,2 + 0,4e^{\frac{0,6}{z_{nag.}}} \quad (12)$$

$x$  – względny strumień ciepła dostarczany przez instalację c.o., w stosunku do stanu cieplnego budynku, w momencie rozpoczęcia etapu nagrzewania, które należy określać ze wzoru [2]:

$$x = J_{nag.} \frac{t_{p.w.}^{obl.} - t_{p.z.}}{t_{p.w.}^{p.nag.} - t_{p.z.}}, \quad (13)$$

gdzie:

$t_{p.w.}^{obl.}$  – obliczeniowa temperatura powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach ogrzewanych;

$t_{p.w.}^{p.nag.}$  – temperatura powietrza wewnętrznego na początku etapu nagrzewania;

$J_{nag.}$  – względna moc cieplna instalacji c.o. w etapie nagrzewania (w stosunku do obliczeniowej mocy przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego).

### 3. Wyniki obliczeń

Badany obiekt to cztero-kondygnacyjny budynek dydaktyczny Politechniki Koszalińskiej przy ul. Raclawickiej, w którym przeprowadzono kompleksową termomodernizację ścian, stolarki okiennej-drzwiowej oraz instalacji centralnego ogrzewania.

Dla danych architektonicznych badanego obiektu oraz temperatury powietrza zewnętrznego  $-5^{\circ}\text{C}$  wyznaczono następujące wartości:

1. Jednostkowe straty ciepła budynku:  $0,099 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;
2. Stała czasowa współczynnika akumulacyjności cieplnej: 40,193 h;
3. Względne dostarczanie ciepła przez instalację c.o., w stosunku do warunków cieplnych budynku, w momencie rozpoczęcia etapu nagrzewania:  $x = 1,936$ ;
4. Temperatura stanu budynku przy dwustopniowej regulacji, przy względnej mocy cieplnej instalacji c.o. w etapie nagrzewania  $J_{nag.} = 1,65$  przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Obliczenia dla modelu matematycznego I  
**Table 1.** Results of the mathematical model I

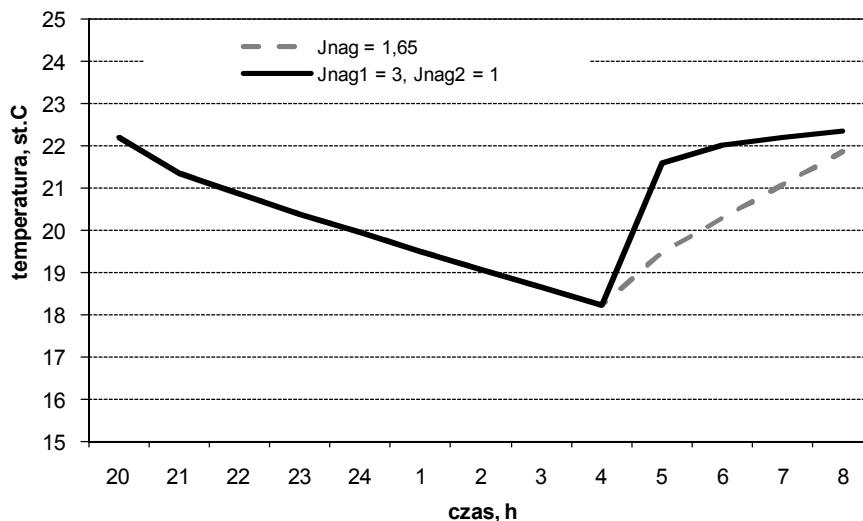
STAN	Q <sub>co</sub> , %	t, godz.	Z, godz.	a	b	t <sub>p.w.</sub> , °C
Normalny	100	20	0	-	-	22,2
Schładzanie	0	21	1	0,779	31,290	21,344
	0	22	2	0,978	39,304	20,851
	0	23	3	1,085	43,618	20,392
	0	24	4	1,150	46,215	19,945
	0	1	5	1,193	47,936	19,506
	0	2	6	1,223	49,158	19,075
	0	3	7	1,246	50,068	18,651
	0	4	8	1,263	50,773	18,235
Ogrzewanie	165	5	1	0,420	16,862	19,481
	165	6	2	0,496	19,949	20,300
	165	7	3	0,527	21,202	21,091
	165	8	4	0,544	21,876	21,852

W warunkach rzeczywistych względna moc cieplna instalacji c.o. podczas nagrzewania nie stanowi stałej wartości przez cały czas ogrzewania wychłodzonego obiektu [6]. W momencie włączenia pomp obiegowych następuje znaczny lecz krótkotrwały, nawet kilkukrotny wzrost mocy dostarczonej do budynku, spowodowany dużą różnicą między temperaturą wody zasilającej i powrotnej. Wobec tego model matematyczny został skorygowany o wzmocnienie  $J_{nag} = 3$  w pierwszej godzinie nagrzewania i względne dostarczanie ciepła przez instalacje c.o., w stosunku do warunków cieplnych budynku w momencie rozpoczęcia etapu nagrzania,  $x = 3,512$ . W kolejnych zaś godzinach podtrzymano normalny poziom względnej mocy cieplnej instalacji c.o.  $J_{nag} = 1$  oraz  $x = 1,171$  i otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 2.

Na podstawie obliczeń z tabeli 1 i 2 powstał wykres (rys. 1) obrazujący zmiany temperatury wewnętrznej w badanym obiekcie, przy stałym wzmocnieniu mocy dostarczonej do budynku, jak i wynikającym z charakterystyki pracy węzła cieplnego, czyli okresowym wzroście zasilania w energię cieplną.

**Tabela 2.** Obliczenia dla modelu matematycznego II  
**Table 2.** Results of the mathematical model II

STAN	Q <sub>co2</sub> , %	t, godz.	z, godz.	a	b	t <sub>p.w.</sub> , °C
Normalny	100	20	0	-	-	22,2
Ochładzanie	0	21	1	0,779	31,290	21,344
	0	22	2	0,978	39,304	20,851
	0	23	3	1,085	43,618	20,392
	0	24	4	1,150	46,215	19,945
	0	1	5	1,193	47,936	19,506
	0	2	6	1,223	49,158	19,075
	0	3	7	1,246	50,068	18,651
	0	4	8	1,263	50,773	18,235
Ogrzewanie	300	5	1	0,420	16,862	21,596
	100	6	2	0,496	19,949	22,029
	100	7	3	0,527	21,202	22,194
	100	8	4	0,544	21,876	22,354



**Rys. 1.** Wyniki obliczeń dla różnych metod wyznaczania etapu nagrzewania  
**Fig. 1.** Results of calculations for the various methods of marking the stage of warming

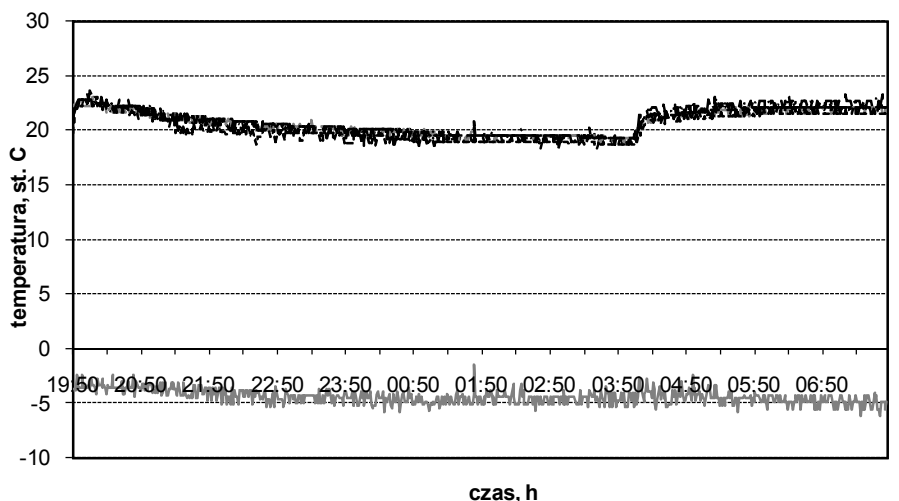
#### 4. Wyniki badań

W badanym pomieszczeniu zainstalowano termoelektryczne czujniki temperatury – termoelementy umieszczone na wysokości 1,5 m od podłogi

i w odległości 0,15 m od ścian wewnętrznych oraz termopara zamontowana w środku pomieszczenia i jedną na zewnątrz. [5]

Pomiary zostały wykonywane w godzinach od 20:00 do 7:00. W obu eksperymentach 23/24.02.2007r. i 26/27.02.2007r. węzeł był całkowicie wyłączony (od godziny 20:00 do 4:00), a następnie uruchomiony w trybie normalnej pracy („nastawa komfortu cieplnego” – 19°C na sterowniku węzła cieplnego), ale przy różnych warunkach klimatycznych. W pierwszym eksperymencie średnia temperatura wyniosła -5°C, w drugim 4°C.

Wyniki pomiarów temperatury wewnątrz i na zewnątrz obiektu oraz przebiegi ich zmian przedstawiono na rysunkach 2 i 3, odpowiednio dla eksperymentu I i II. Widoczne w drugim eksperymencie jest mniejsze obniżenie temperatury powietrza wewnętrznego, spowodowane dużo wyższą temperaturą zewnętrzną. Rys. 1. i 2. pokazuje powolny spadek temperatur przy całkowitym wyłączeniu zasilania w węzle cieplnym, a następnie szybki jej wzrost wewnątrz badanego budynku, po uruchomieniu węzła.



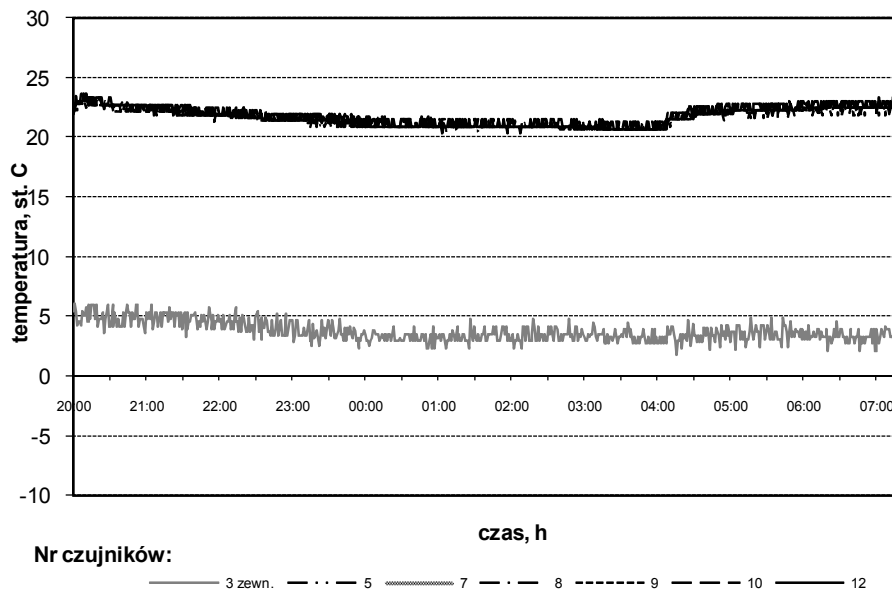
Nr czujników:

———— 1 zewn.    ..... 9    - . - . 4    ..... 5    - - - - 7    - - - - - 8    - . . . 12    - - - - 10

**Rys. 2.** Temperatura wewnątrz i na zewnątrz pokoju podczas pracy węzła cieplnego wyłączonego 20:00÷4:00 oraz włączonego 4:00÷7:00 23/24.02.2007r.

**Fig. 2.** Temperature inside and outside room during work of heating junction switched off 20:00÷4:00 and turned on 4:00÷7:00 23/24.02.2007



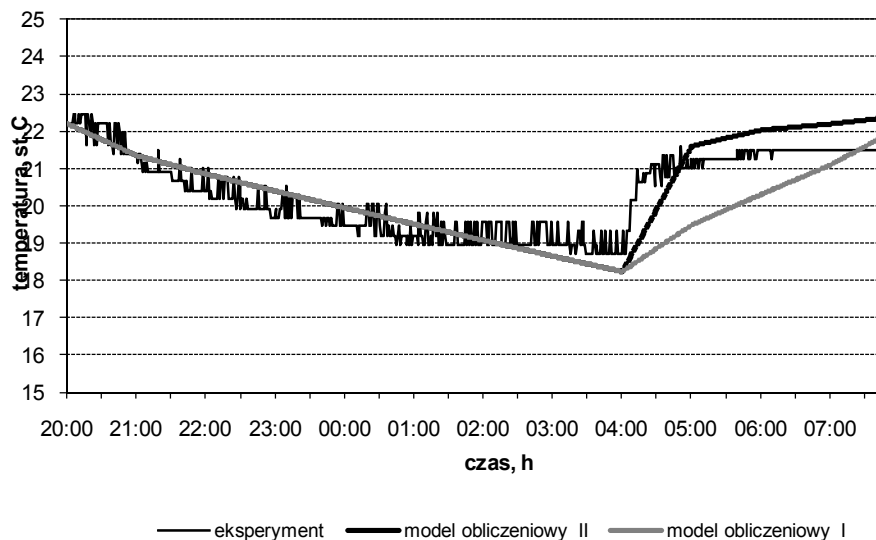


Rys. 3. Temperatura wewnątrz i na zewnątrz pokoju podczas pracy węzła cieplnego wyłączzonego 20:00÷4:00 oraz włączonego 4:00÷7:00 26/27.02.2007r.

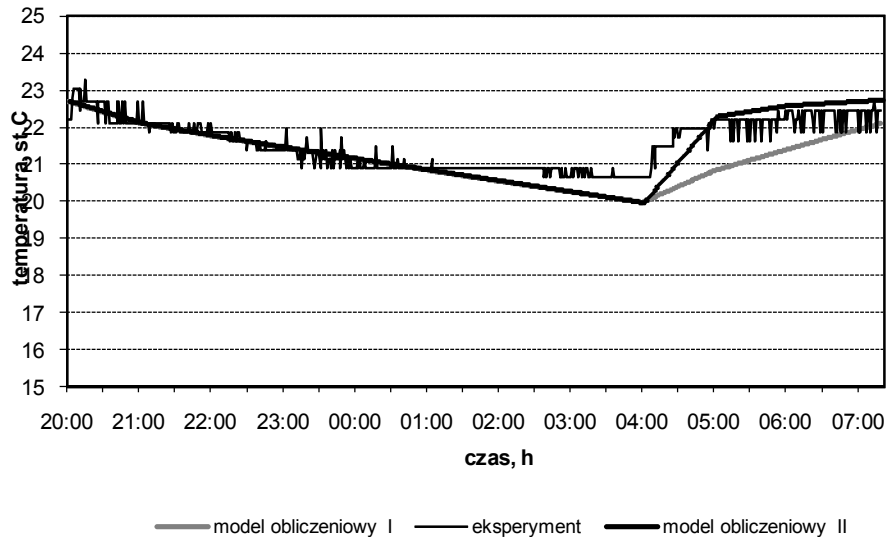
Fig. 3. Temperature inside and outside room during work of heating junction switched off 20:00÷4:00 and turned on 4:00÷7:00 26/27.02.2007

## 5. Porównanie wyników obliczeń teoretycznych z eksperymentem

Na podstawie wykonanych obliczeń według pierwszego modelu matematycznego i modelu skorygowanego dokonano porównania z wynikami eksperymentu przeprowadzonego 23/24.02.2007r. (rys. 4.) Analogicznie porównano obliczenia teoretyczne na podstawie obu modeli matematycznych z wynikami badań przeprowadzonych w nocy z 26/27.02.2007r.



Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń z eksperymentem 23/24.02.2007r.  
Fig. 4. Comparison of the results of calculations with the experiment 23/24.02.2007



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń z eksperymentem 26/27.02.2007r.  
Fig. 5. Comparison of the results of calculations with the experiment 26/27.02.2007

## 6. Wnioski

Przedstawione modele matematyczne, opisujące zmianę temperatury wewnętrznej w badanym obiekcie, mają na celu określenie najniższej osiągalnej temperatury oraz tempa powrotu do warunków cieplnych z początku regulacji c.o. Oba modele w taki sam, bardzo zbliżony do rzeczywistych wyników, sposób przedstawiają etap schładzania pomieszczeń, jednak znacznie różni je etap nagrzewania. Model matematyczny ze stałą względną mocą cieplną instalacji c.o. w etapie nagrzewania (w stosunku do obliczeniowej mocy przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego), wyznacza powolny wzrost temperatury wewnętrznej. Model skorygowany o krótkotrwały, maksymalnie godzinny okres 3-krotnej wartości względnej mocy cieplnej instalacji grzewczej, powoduje szybki wzrost temperatury wewnątrz badanego pomieszczenia. Poprawiony model obliczeniowy pozwala uzyskać o wiele lepiej dopasowane wartości temperatury wewnętrznej do wyników badań przeprowadzonych dla różnych warunków pogodowych (rys. 4 i 5).

Metodyka obliczeń pozwala na wyznaczenie kolejnych temperatur powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach ogrzewanych. Oba modele pozwalają prawidłowo wyznaczyć minimalną temperaturę podczas schładzania. Wartości te są o około  $0,5^{\circ}\text{C}$  niższe niż podczas doświadczeń. Wynikać to może ze zbyt niskiego określenia wpływu mostków termicznych i zbyt niskich wartości współczynników przenikania ciepła przez strop i fundamenty, wykorzystanych do obliczenia jednostkowych strat ciepła budynku.

Istotne jest również to, iż oba modele matematyczne pozwalają na prawidłowe wyznaczenie momentu i wartości temperatury wewnętrznej na końcu etapu nagrzewania.

## Literatura

1. **Szkarowski A., Łatowski L.:** *Sieci i centrale ciepłe*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin, 2002.
2. **Szkarowski A., Łatowski L.:** *Ciepłownictwo*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2006.
3. **Szkarowski A., Dyczkowska M.:** *Szczegóły programowej regulacji instalacji c.o. w budynkach o podwyższonej izolacyjności cieplnej*. Systemy Inżynieryjne. Sankt-Petersburg, Nr 1(17), 2005.
4. **Szkarowski A., Dyczkowska M.:** *Symulacja i badania oszczędzania energii w budynkach o podwyższonej izolacyjności cieplnej*. VIII Ogólnopolska Konferencja w Problematyce Inżynierii Środowiska „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”, Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Nr 23. Koszalin – Darłówko, str. 267, 2007.

5. Szkarowski A., Dyczkowska M.: *Analiza sterowania czasem pracy węzła cieplnego dla budynku po termomodernizacji*. XXX Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Darłówek, tom II str. 987, 2007.
6. Szkarowski A., Dyczkowska M.: *Wpływ sterowania czasem pracy węzła cieplnego na stan temperaturowo-wilgotnościowy przegród budowlanych*. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 10, str. 347-348, 2008.

## **Method of the Energy-saving Control of the Heating Systems in the Buildings with the Improved Heat Insulation – Comparison of Mathematical Model with the Results of the Experiment**

### **Abstract**

The comparative analysis of the results of theoretical calculations with experimental results executed for the same object was the aim of the work. The method of control of heating junction work was applied in the studied building in order to decrease energy usage. The studied object is 4-level building of Koszalin University of Technology in which complex thermal modernization was conducted.

The delimitation of the course of the changes of the internal temperature in the building in which the 2-graded control was applied the work of the heating junction sometimes is the object of calculations. It was affirmed on the basis of the results of testing, that the relative thermal power of the heating system does not make up while warming by the whole time of the heating of the cooling object in real conditions to the solid value. Considerable follows in the moment of the inclusion of current pumps treat short-lived, even repeated the growth of the power delivered to the building.

Introduced mathematical models, which describe the change of the internal temperature in the object, have on the aim the qualification of the lowest attainable temperature and the pace of return to thermal conditions at the beginning of the control of central heating (Fig. 1.). Both models give almost the same, very approximate to real results, during stage of cooling of the rooms, however during stage of warming they are different considerably. Mathematical model with the solid relative thermal power of the heating system in the stage of warming, determines slow growth of the internal temperature. The corrected model about the short-lived, maximally hourlong period of 3-times the value of the relative power of heating installation, causes the quick growth of temperature inside the examined room and this model gives more close values of internal temperature to results obtained during tests (Fig. 4, 5).

The methodology of calculations allows to mark the next temperatures of the internal air in heated rooms. Both models allow to correctly determine minimum temperature while cooling. These values are only about 0,5°C lower than during experiments. Both mathematical models allow to mark moment and the value of internal temperature at the end of the stage of heating.