

Artur BOROWCZYŃSKI¹
Dariusz HEIM²

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ BUDYNKÓW Z WYBRANYMI SYSTEMAMI STEROWANIA INSTALACJĄ OGRZEWczą

Artykuł zawiera analizę porównawczą wybranych modeli sterowania systemem ogrzewania w odniesieniu do ich efektywności energetycznej. Analiza dotyczy pomieszczenia biurowego o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię. Pomieszczenie przeznaczone jest do pracy z komputerem jednej osoby w średnim wieku. Biuro jest użytkowane jedynie w dni robocze przez 8 godzin. Proponowanym rozwiązaniem energooszczędnym jest zastosowanie systemów zarządzania budynkiem BMS. W pracy zostało opisanych pięć algorytmów sterowania instalacją ogrzewczą. Określono model ich pracy i omówiono charakterystyczne cechy. Wykonano model obliczeniowy właściwie opisujący parametry pomieszczenia, obliczenia przeprowadzono dla danych klimatycznych wg. ISO dla Łodzi, dla pojedynczego tygodnia zimowego. Wykonano symulacje z uwzględnieniem dynamiki procesów cieplnych za pomocą programu ESP-r. W wynikach pokazano profile temperatury dla każdego z systemów. Zwrócono uwagę na ich nieregularny przebieg. Zaprezentowano również rezultaty wskaźników komfortu cieplnego, jako kryterium wykorzystano wskaźnik PPD. Ostatnie wyniki dotyczą zapotrzebowania na energię do ogrzewania dla całego tygodnia. Najbardziej energooszczędnym okazał się sterownik PID, najmniej adaptacyjny. Z kolei najwyższy komfort odnotowano dla sterownika adaptacyjnego oraz wielostopniowego, najmniejszy dla regulatora PID. Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że wybór modelu sterowania ma znaczący wpływ na efektywność energetyczną i jakość środowiska wewnętrznego. Ponadto, dla rozpatrywanych modeli większa oszczędność energii przekłada się na pogorszenie parametrów komfortu.

Słowa kluczowe: energia, komfort cieplny, system ogrzewczy, systemy zarządzania budynkiem, model sterowania

¹ Autor do korespondencji: Artur Borowczyński, mgr inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Wólczańska 213, tel. 608-226-552, e-mail: artur.borowczynski@wipos.p.lodz.pl

² Dariusz Heim, dr. hab. inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Wólczańska 213, tel. (42) 631-37-82, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

1. Wprowadzenie

Postępujący wzrost gospodarczy i rozwój technologiczny mają negatywny wpływ na zużycie energii pierwotnej. Szacuje się, że w krajach Unii Europejskiej sektor budowlany jest odpowiedzialny za konsumpcję nawet do 40% całkowitej energii, z czego dla budynków biurowych około 50% stanowi energia przeznaczana na ogrzewanie, wentylację oraz klimatyzację [5]. Dlatego zabiegi mające na celu zmniejszenie zapotrzebowania na energię zyskują coraz większe znaczenie przy projektowaniu i modernizacji budynków. Przejawia się to również w polityce europejskiej, poprzez wprowadzenie systemu certyfikacji energetycznej oraz wielu restrykcyjnych przepisów prawnych [4].

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia energii jest zastosowanie systemów zarządzania budynkiem (*ang. Building Management Systems, BMS*) dedykowanych kontroli systemów ogrzewania. Istnieje wiele algorytmów sterujących, pozwalających na swobodne dostosowanie parametrów źródła ciepła, czasu jego pracy czy temperatury czynnika grzewczego przy jednoczesnej efektywnej i optymalnej energetycznie pracy układu grzewczego [2, 8]. Jednak ważnym aspektem, szczególnie w obiektach biurowych, jest także jakość środowiska wewnętrznego. Prowadzone badania wykazały [3], że komfort termiczny użytkowników jest istotny i znacząco wpływa na wydajność pracy.

Celem artykułu jest analiza pięciu wybranych modeli sterowania systemem ogrzewczym pod kątem efektywności energetycznej oraz jakości środowiska wewnętrznego. Praca ma na celu pokazanie wyraźnego związku pomiędzy zużyciem energii a komfortem termicznym użytkowników. W celu pokazania powyższej zależności przeprowadzono symulacje z wykorzystaniem programu ESP-r na podstawie rzeczywistego pomieszczenia biurowego o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię.

2. Modele sterowania

2.1. Idealny model sterowania (I)

Pierwszy z analizowanych modeli sterowania to idealny regulator pracujący na zasadzie przełącznika włącz/wyłącz. Opisuje go najprostszy z modeli sterowania. Dla potrzeb ogrzewania niezbędne jest zdefiniowanie jedynie trzech parametrów: minimalnej i maksymalnej mocy cieplnej źródła oraz temperatury powietrza wewnętrznego. Po rozpoczęciu pracy sterownik dąży do osiągnięcia zadanej temperatury, która zostaje utrzymywana na stałym, niezmiennym poziomie. Model sterowania jest nazwany idealnym, jednak tak idealne sterowanie jest niemal niemożliwe do osiągnięcia w praktyce. Niezwykle trudne jest utrzymanie stałej zadanej temperatury na niezmiennym poziomie w dynamicznie zmieniających się warunkach termicznych, wobec tego jest to idealizacja modelu fizycznego zachowania się budynku.

2.2. Sterownik PID (II)

Regulator PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkujący) wykorzystuje bardzo powszechny model sterowania, stosowanym również szeroko w przemyśle. Ze względu na trzy składowe działania algorytmu, sterownik jest w stanie znacznie ograniczyć odchyły od wartości zadanej. Człon całkujący zapobiega nagromadzeniu się uchybów podczas dłuższej pracy, natomiast różniczkujący odpowiada za ograniczenie oscylacji w przypadku dynamicznych zmian mierzonej wartości. Połączenie tych własności pozwala na precyzyjne operowanie sterowaną wartością w zadanym przez użytkownika zakresie [6].

2.3. Wielostopniowy model sterowania (III)

Regulator wielostopniowy z histerezą bazuje na efektywnym zarządzaniu źródłem ciepła. Sterownik zakłada kilkietapową pracę, przy np. trzech zdefiniowanych parametrach mocy źródła. Energia na ogrzewanie jest dostarczana etapami, jeżeli dana pojemność cieplna jest wystarczająca, sterownik pracuje w jednym trybie. Jeżeli wymagane jest zwiększenie bądź zmniejszenie mocy, sterownik przełącza tryb źródła. Dodatkowo model zakłada wykorzystania histerezy, czyli pozwala na regulowanie temperatury np. w zakresie 2 K większym bądź mniejszym od ustalonej. Przekłada się to na bardziej wydajne wykorzystanie poszczególnych trybów pracy źródła, powoduje jednak zjawisko oscylacji temperatury odczuwalnej.

2.4. Adaptacyjny model sterowania (IV)

Adaptacyjny model sterowania pozwala na częściowe uwzględnienie komfortu termicznego użytkowników pomieszczenia. Realizowany jest przez dwa parametry: średnią odpowiedź na temperaturę oraz ograniczenie temperatury. Na podstawie pierwszego z nich i zadanej temperatury model oblicza właściwą temperaturę niezbędną dla zapewnienia wysokiej jakości komfortu wewnętrznego. Drugi parametr służy do ograniczenia pracy źródła, bez względu na wynik obliczeń komfortu cieplnego (ograniczenie dużych wahań temperatury).

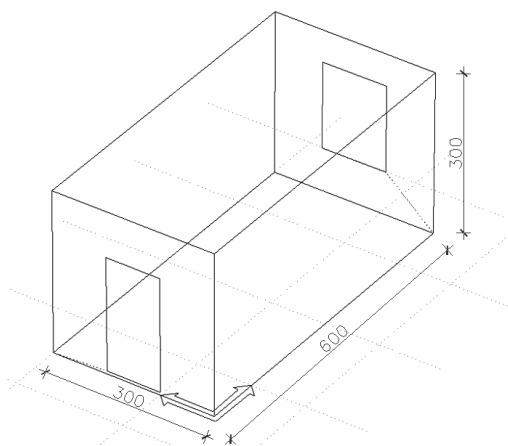
2.5. Regulator temperatury powietrza o stałej objętości (V)

Ostatni model sterowania stosowany jest w przypadku, kiedy ogrzewanie odbywa się za pomocą powietrza. Przy założeniu stałego strumienia przepływu objętość powietrza w pomieszczeniu nie zmienia się w czasie. Koniecznym jest również określenie zakresu temperatur wdmuchiwanego powietrza. System sprawdza się w instalacjach wentylacji mechanicznej, także podczas chłodzenia. Zaletą tego rozwiązania jest również stały profil temperatury.

3. Model obliczeniowy

Jako wzór do modelowania przyjęto rzeczywiste pomieszczenie znajdujące się w budynku Instytutu Papiernictwa i Poligrafii Politechniki Łódzkiej i przeznaczone do modernizacji. Aby poprawić charakterystykę energetyczną pomieszczenia, do istniejących konstrukcji ścian została dodana 15 centymetrowa warstwa izolacji termicznej (wełna mineralna) oraz wyeliminowano występujące mostki termiczne. Tak więc pomieszczenie należy rozpatrywać w kategoriach obniżonego zapotrzebowania na energię.

Pomieszczenie jest o szerokości 3 m, długości 6 m i wysokości 3 m, co daje łączną powierzchnię użytkową 18 m^2 . Podstawową budowę ścian stanowi warstwa konstrukcyjna (różniaca się w zależności od rodzaju ściany), warstwa izolacji w postaci wełny mineralnej, płyta gipsowo-kartonowa oraz tynk. Stropy są konstrukcji betonowej izolowanej styropianem, posadzka wykonana jest z płytek ceramicznych. Pojedyncze okno podwójnie oszklone o wymiarach 1,2 m na 1,6 m znajduje się na ścianie zewnętrznej. Wejście do pomieszczenia stanowią drzwi drewniane o wymiarach 1,0 m na 2,1 m.



Rys. 1. Geometria modelu w ESP-r

Fig. 1. The geometry of model in the ESP-r

Pomieszczenie jest typu biurowego, przeznaczone do pracy z komputerem w pozycji siedzącej jednej osoby w średnim wieku. Dla potrzeb oceny komfortu wewnętrznego założono, że wykonywana praca jest średnio intensywna (70 W/m^2) oraz że osoba jest ciepło ubrana ($0,9 \text{ clo}$), w sposób właściwy dla zimowego okresu. Wewnątrz znajduje się komputer stacjonarny z monitorem i drukarką. Biuro jest wyposażone w podstawowe meble, oświetlane jest przez układ dwóch lamp. W celu określenia wewnętrznych zysków ciepła oraz strumienia powietrza przypadającego na jedną osobę wykorzystano dane z [1].

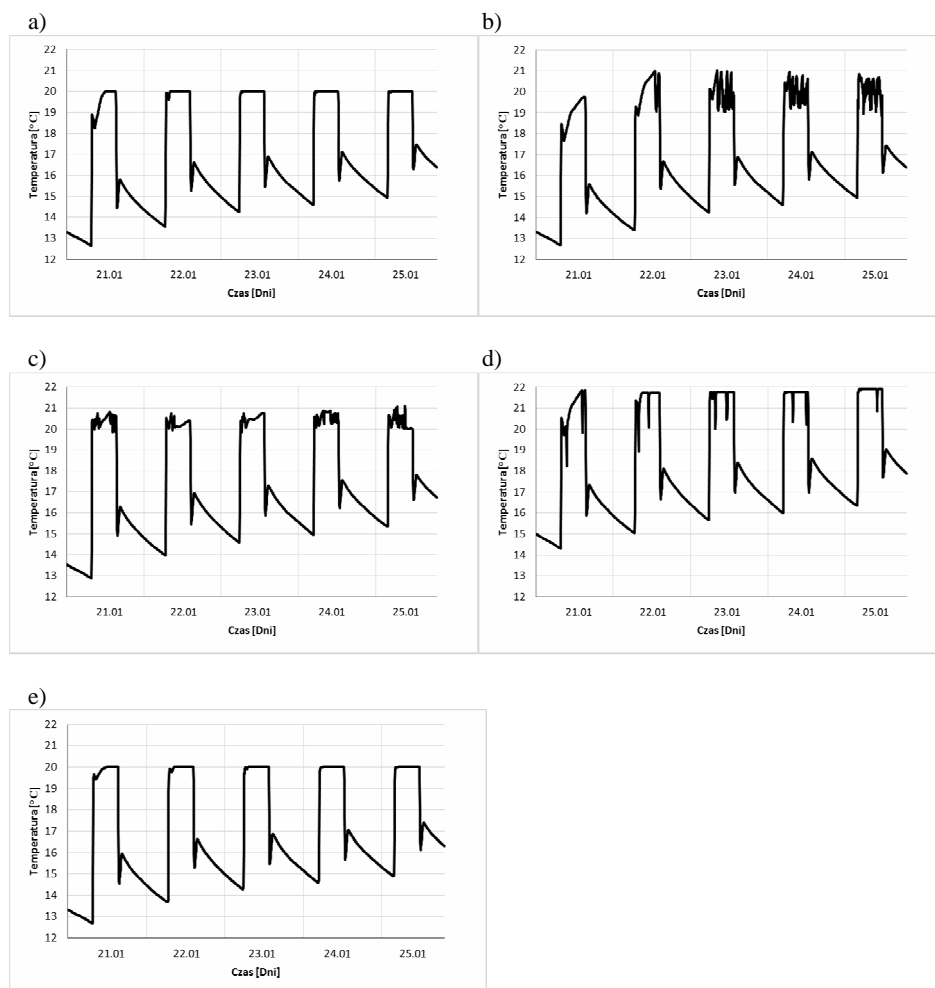
Dane klimatyczne przyjęto jako dane dla typowego roku meteorologicznego ISO dla miasta Łodzi [7]. Analiza zakłada sterowanie ogrzewaniem, w związku z tym jako okres prowadzenia obliczeń przyjęto tydzień od 21 do 27 stycznia, kiedy to odnotowano najniższe temperatury powietrza zewnętrznego.

Dla potrzeb symulacji założono, że użytkowanie pomieszczenia w dni robocze odbywa się od godziny 8:00 do 16:00, w weekend biuro jest nieużytkowane. Pomieszczenie zasilane jest przez system ogrzewania powietrznego o maksymalnej mocy równej 1 kW. Zadaniem systemu sterowania jest ogrzanie pomieszczenia do temperatury 20 °C i utrzymanie jej na stałym poziomie w czasie użytkowania biura.

Tak zdefiniowany model został wprowadzony do programu ESP-r, który pozwala na analizę procesów fizyko-budowlanych zachodzących w budynkach. Symulacje zostały przeprowadzone dla każdego z wariantów sterowania, z krokiem czasowym wynoszącym 5 minut.

4. Wyniki

Przeprowadzona analiza wykazała, że dobór systemu sterowania ogrzewaniem ma kluczowe znaczenie dla czasowego rozkładu temperatury w pomieszczeniu. Profil zmiany temperatury dla regulatorów I oraz V jest bardziej stabilny, natomiast dla pozostałych regulatorów można zauważyć wyraźne oscylacje wokół temperatury docelowej. Związane jest to z odmiennym algorytmem sterowania każdego z nich. Należy jednak zauważyć, że zmiany te przebiegają stopniowo, w przeciągu kilkunastu lub kilkudziesięciu minut, dlatego nie są odczuwalne dla człowieka. Ponadto efektywność sterowania jest różna w zależności od dni poprzedzających okres ogrzewania. Dla poniedziałku następującego po dwóch dniach bez ogrzewania (weekend) jest zdecydowanie niższa niż dla piątku (po czterech dniach ogrzewania), pomimo nocnego osłabienia.

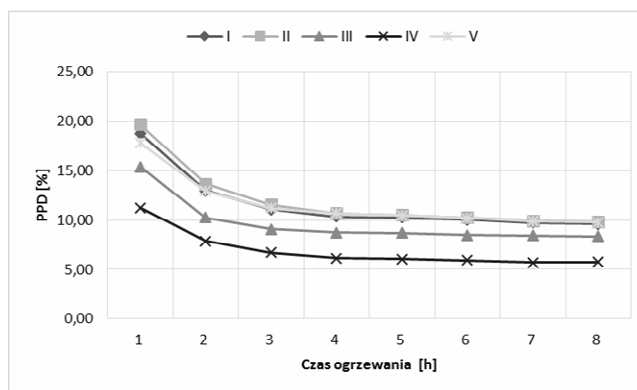


Rys. 2. Tygodniowy rozkład temperatury w pomieszczeniu dla a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Fig. 2. The weekly temperature distribution in room for a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Do oceny parametrów komfortu wewnętrznego wykorzystano wskaźnik PPD (*ang. Predicted Percent of Dissatisfied People*), który pozwala oszacować procent osób niezadowolonych z parametrów środowiska wewnętrznego. Wskaźnik ten zależy od indywidualnych różnic w odczuwaniu komfortu przez osoby przebywające w danym pomieszczeniu. Zaleca się jednak żeby nie przekraczał wartości 10%. Na rysunku 3, przedstawiona została zmiana średniej wartości wskaźnika w okresie pracy systemu ogrzewania. Można zaobserwować zbliżony charakter krzywej dla każdego z przyjętych wariantów sterowania. W pierwszych godzinach pracy ogrzewania wskaźnik PPD przekracza war-

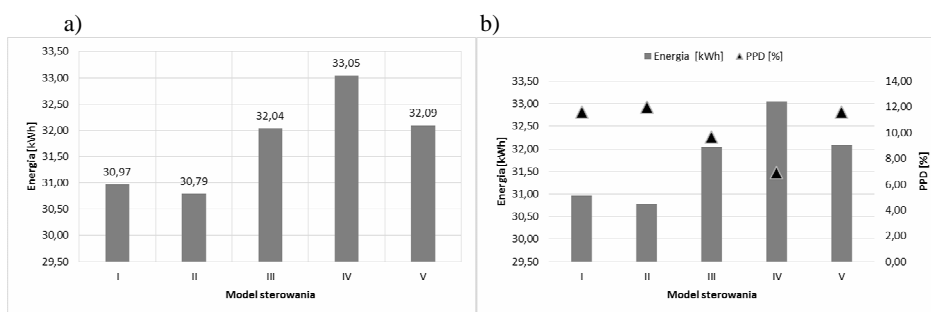
tość graniczną, jednak w następnych (kiedy temperatura w pomieszczeniu stabilizuje się) jego wartość zmniejsza się osiągając pożądane wartości.



Rys. 3. Zmiana wskaźnika PPD w okresie ogrzewania

Fig. 3. The change of PPD indicator during the heating period

Ostatnim etapem prowadzonej analizy było określenie ilości energii dla potrzeb ogrzewania. W skali tygodnia zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dla rozpatrywanego pomieszczenia mieści się w zakresie od 30,8 do 33,0 kWh, co daje różnicę pomiędzy skrajnymi modelami sterowania (idealnym i adaptacyjnym) na poziomie 2,2 kWh (6,66%). Może się to wydawać nieznaczną wartością, jednak należy pamiętać, że ta różnica dotyczy ogrzewania tylko jednego (niezbyt dużego) pomieszczenia w okresie tygodnia. Gdyby rozpatrywać cały sezon grzewczy oraz cały budynek biurowy, oszczędność ta stanowiłaby znaczną różnicę w kosztach energii.



Rys. 4. a) Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, b) zestawienie zapotrzebowania na energię oraz wartości wskaźnika PPD

Fig. 4. a) The heating energy demand, b) the juxtaposition of heating energy demand and PPD indicator values

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że wybór odpowiedniej strategii sterowania ogrzewaniem ma duży wpływ zarówno na efektywność energetyczną pomieszczenia jak i na jakość środowiska wewnętrznego. Znaczącym elementem jest także charakterystyka temperatury, mniejsze wahania jej wartości są bardziej pożądane. Decydując się na dany wariant sterowania należy mieć na uwadze osiągnięcie równowagi pomiędzy tymi czynnikami.

Na rysunku 4.b zostało przedstawione zestawienie parametru efektywności energetycznej (zapotrzebowania na energię) oraz parametru komfortu wewnętrznego (wskaźnik PPD). Rozpatrywany sterownik PID jest najbardziej oszczędnym, jednak zapewnia najniższą jakość środowiska wewnętrznego. Natomiast adaptacyjny model sterowania cechuje się wysokim komfortem przy jednoczesnym wysokim koszcie ogrzewania. Na podstawie wyników można wyciągnąć wniosek, że dla rozpatrywanych modeli sterowania zwiększona efektywność energetyczna może zostać osiągnięta kosztem pogorszenia jakości środowiska wewnętrznego.

Przeprowadzoną analizę można rozszerzyć poprzez uwzględnienie sterowania temperaturą przy założeniu stałej wartości wskaźnika PPD. Innym rozwiązaniem jest sprawdzenie większej ilości algorytmów sterowania (np. proporcjonalno czasowego bądź logiki rozmytej).

Literatura

- [1] 2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 29: Nonresidential cooling load calculation procedures.
- [2] Antonio Colmenar-Santos, Lya Noemí Terán de Lober, David Borge-Diez, Manuel Castro-Gil: Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings. *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 66-77.
- [3] Djongyang N., Tchinda R., Njomo D.: Thermal comfort: A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Issue 9, s. 2626 – 2640, 2010.
- [4] Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [5] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout: A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40 (2008), pp.394–398.
- [6] MacQueen J (1997) 'The modelling and simulation of energy management control systems', PhD Thesis, Glasgow: University of Strathclyde.
- [7] Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju <http://www.mir.gov.pl/>.
- [8] Rui Yang, Lingfeng Wang: Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 1-7.

THE COMPARISON OF ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS WITH SELECTED HEATING CONTROL SYSTEMS

Summary

This paper is a comparative analysis of selected models of heating control systems in relation to energy efficiency. The analysis is related to the office space with reduced energy demand. The space is designed for work with computer for a single person. The office is used only on weekdays for 8 hours a day. The introduction describes the problem of primary energy consumption in buildings. One of the proposed solution is to use BMS. Five different control algorithms has been described and characterized. The simulation model was built. The calculations for a coldest winter week were performed with use of ISO climate data for Lodz. Dynamic simulations were conducted using ESP-r software. The results shows the indoor temperature profiles for each of the systems. Also the results of thermal comfort with PPD indicator as a criterion were presented. Obtained values were very similar. Last results concerned the energy demand for heating for whole week period. PID controller was proved to be the most efficient and adaptive controller the least. On the other hand, the highest comfort was reported for adaptive and multistage controllers. The conducted analysis shows, that the choice of control strategy has a significant impact on energy efficiency and indoor environmental quality.

Keywords: energy, thermal comfort, heating system, building management systems, control model.

DOI:10.7862/rb.2014.75

Przesłano do redakcji: 14.05.2014 r.

Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.

