

Karol BANDURSKI, Halina KOCZYK\*

## ZACHOWANIE UŻYTKOWNIKÓW WSPÓŁCZESNYCH BUDYNKÓW MIESZKALNYCH – ZNACZENIE I MODELOWANIE

W referacie wyjaśniono istotność zachowania użytkowników dla nowoczesnych budynków. Na podstawie przeglądu stanu wiedzy zaprezentowano klasyfikacje zachowań i ich czynników napędzających oraz omówiono ich wpływ na energochłonność budynków. Scharakteryzowano metody modelowania zachowania użytkowników w symulacjach energetycznych budynków.

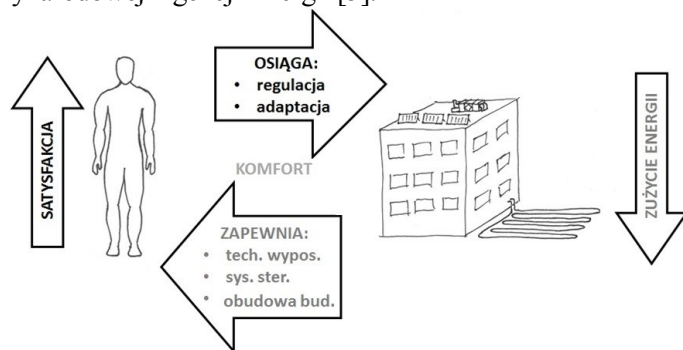
### 1. WPROWADZENIE

Wznoszenie i użytkowanie budynków jest procesem złożonym i kosztownym zarówno w sensie ekonomicznym, jak i środowiskowym. Szacuje się, że w północnych krajach Unii Europejskiej energia końcowa konsumowana przez budynki stanowi 41 % jej całkowitego zużycia [1]. Dlatego podejmowane i udoskonalane są działania mające na celu ograniczenie zużycia energii [2]. Patrząc jednak na problem z szerszej perspektywy należy zauważyć, że, jak głoszą tytuły dwóch najważniejszych obecnie periodyków naukowych w naszej dziedzinie, kwestia odnosi się nie tylko do *Energy and Buildings*, ale również do *Building and Environment*. Aspekt wpływu budynku na środowisko, zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne, jest najistotniejszy. Stąd występujące w literaturze sformułowanie *building performance* (z ang. efektywność budynku), które odnosi się zarówno do efektywności energetycznej jak i jakości środowiska wewnętrznego. Nicol [3] przekonuje, że drogą do budynków efektywnych jest traktowanie ich jako narzędzia do osiągnięcia komfortu, a nie tylko miejsca gdzie ma on być gwarantowany (Rys. 1). Okazuje się, że działania użytkowników (m.in. te mające na celu osiągnięcie komfortu) powodują duże zróżnicowanie w zużyciu energii przez identyczne obiekty oraz wywołują brak zbieżności między wyni-

---

\* Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska.

kami symulacji budynków a rzeczywistym zużyciem mediów przez ich systemy techniczne. Co więcej dowiedziono, że możliwość samodzielnego kształtowania środowiska wewnętrznego w budynku zdecydowanie zwiększa satysfakcję z jego użytkowania i poszerza zakres tolerowanych parametrów klimatu wewnętrznego [4]. W związku z powyższym poszukiwanie optymalnych rozwiązań w budownictwie (globalne ekstrema, charakteryzujące się stabilnością) wymaga głębszego zrozumienia, opisanie i realistycznego modelowania zachowania użytkowników w budynkach. Niniejszy referat mający na celu przybliżenie tych zagadnień i ich znaczenia, jest częścią pracy w ramach międzynarodowego projektu Międzynarodowej Agencji Energii [5].



Rys. 1. Budynek jako narzędzie w rękach użytkownika.

Fig. 1. Building as a tool handled by occupant.

Tabela 1. Przykładowe zachowania użytkowników w budynkach mieszkalnych.

Table 1. Examples of occupant behaviour in buildings.

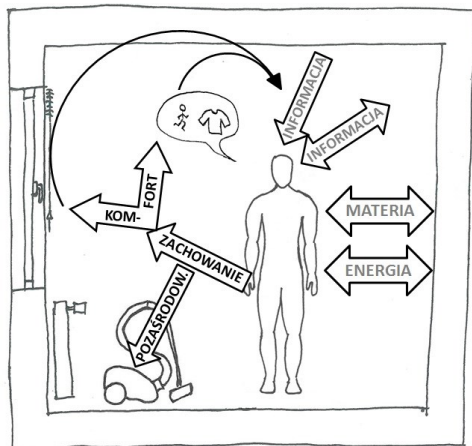
Pasywne - generujące	Aktywne - modyfikujące
obecność, aktywność (metabolizm), gotowanie, sprzątanie, suszenie prania, zyski od urządzeń elektrycznych, regulacja oświetleniem	regulacja ogrzewaniem, otwarciem okien, instalacją wentylacyjną, klimatyzacją, zacieleniem*, zmiana aranżacji pomieszczenia

\*promieniowaniem słonecznym docierającym do wnętrza budynku

## 2. ZACHOWANIA UŻYTKOWNIKÓW I JEGO WPŁYW NA EFEKTYWNOŚĆ BUDYNKU

Człowiek wchodzi w interakcję z otoczeniem na dwa sposoby: przez wymianę energii i masy (np. ciepło, powietrze, pokarm, światło) oraz wymianę lub rejestrowanie informacji [6]. W kontekście budynku, powyższe interakcje również mają miejsce (Rys. 2). Człowiek podejmuje działania mające wpływ na funkcjonowanie budynku i jego środowisko wewnętrzne. Działania te z jednej strony są podyktowane chęcią przebywania w warunkach komfortu (cieplnego, wizualnego, akustycznego itd.), a z drugiej strony wynikają z motywacji pozaśrodkowych, związanych np. ze zmęczeniem, głodem,

pracą, życiem towarzyskim. Z punktu widzenia budynku i jego technicznego wyposażenia możemy podzielić zachowanie użytkowników na pasywne lub aktywne, albo generujące i modyfikujące (Tab. 1). W tabeli 2 przedstawiono czynniki wpływające na wybrane zachowania aktywne/modyfikujące, część czynników jest dyskusyjna (literatura nie jest jednoznaczna) [7-10]. Czynniki dyskusyjne pogrubiono, a potwierdzone w kilku publikacjach podkreślono.



Rys. 2. Interakcje między człowiekiem a otoczeniem w kontekście budynków mieszkalnych.  
Fig.2. Human-environment interaction in the context of residential buildings.

Tabela 2. Wybór czynników wpływających na przykładowe aktywne zachowania użytkowników budynków mieszkalnych [7-10].

Table 2. The choice of factors influencing occupant behavior in residential buildings.

Regulacja oknami		Regulacja ogrzewaniem	
Środowiskowe	Inne**	Środowiskowe	Inne
<ul style="list-style-type: none"> <li>•jakość powietrza (np. stężenie CO<sub>2</sub>)</li> <li>•temp.zew. i wew.</li> <li>•<b>prędkość wiatru</b></li> <li>•<b>promieniowanie słoneczne</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•<b>wiek/pleć</b></li> <li>•oczekiwana temp.</li> <li>•palenie papierosów</li> <li>•charakterystyka* mieszkania/budynku</li> <li>•rodzaj i sposób sterowania systemem HVAC</li> <li>•pora roku/dnia</li> <li>•wykształcenie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•wilgotność pow.</li> <li>•<u>klimat zew. i wew.</u></li> <li>•temp.zew. i wew.</li> <li>•prędkość wiatru</li> <li>•odczucie ciepłne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•<b>wiek/pleć</b></li> <li>•<b>charak.* mieszkania/budynku</b></li> <li>•<b>rodzaj i sposób sterowania HVAC</b></li> <li>•<b>rodzaj/cena paliwa</b></li> <li>•<b>przychody</b></li> <li>•poprzednie mieszkanie</li> <li>•<b>świadomość korzystania z energii</b></li> <li>•<b>wykształcenie</b></li> </ul>

•orientacja, izolacja, szczelność, rok budowy, itp.

•\* psychologiczne, socjologiczne, fizjologiczne, kontekstowe

Zachowanie użytkowników ma wpływ na efektywność budynku, jednak na potrzeby tego referatu zajęto się głównie ich wpływem wyłącznie na zużycie energii.

Zachowania pasywne mają coraz większe znaczenie z uwagi na wzrost izolacyjności budynków, który umożliwia akumulowanie wewnętrznych zysków ciepła. W [11] dowie-

dziono, że w przypadku budynków energooszczędnych i pasywnych nie ma znaczenia rozkład zysków w czasie, ale ich sumaryczna ilość w ciągu roku. Zwiększenie dwukrotne ilości wewnętrznych zysków ciepła powoduje spadek zapotrzebowania na energię nawet o 50-90% [12,13]. Jednak wzrost zysków ciepła wynika z większej intensywności eksploatacji budynku lub urządzeń, co pociąga za sobą np. wzrost poboru energii elektrycznej lub c.w.u. Z drugiej strony producenci urządzeń elektrycznych dążą do minimalizowania ich energochłonności, a tym samym emisji ciepła.

W przypadku korzystania z systemu grzewczego znaczenie dla zużycia energii ma zadana temperatura instalacji grzewczej, jak i czas korzystania z ogrzewania. Wg [9] największe znaczenie ma czas pracy instalacji grzewczej na najwyższej wybranej nastawie. Różnice wynikają również z grzania tylko części pomieszczeń. Wydaje się, że wzrost izolacyjności budynków minimalizuje wpływ użytkowania systemu grzewczego na zużycie energii [14].

Sposób użytkowania instalacji wentylacyjnej ma mniejszy wpływ na zużycie energii, zwłaszcza gdy korzysta się z wentylacji mechanicznej z wymiennikiem ciepła. W trakcie sezonu grzewczego wentylacja naturalna jest szczególnie uciążliwa ponieważ powoduje dyskomfort, dlatego użytkownicy raczej ją minimalizują, nie zwiększając strat ciepła, ale pogarszając jakość powietrza wewnętrznego [4,9]. Na przepływ powietrza (zużycie energii i komfort środowiska wewnętrznego) ma wpływ zarówno stopień otwarcia nawiewników, okien, jak i układ mieszkania, oraz regulacja drzwiami wewnętrznymi.

Z punktu widzenia sezonu letniego istotna jest regulacja zacienieniem. W okresie zimowym również ma ona znaczenie, ale bardziej dla odczucia komfortu niż zużycia energii.

### 3. MODELOWANIE ZACHOWANIA UŻYTKOWNIKÓW

W praktyce symulacyjnej [5-6, 15-16] panuje przyzwyczajenie do modelowania zachowania użytkowników w sposób deterministyczny: w oparciu o ogólną wiedzę na temat budynku i użytkowników zakłada się harmonogram wewnętrznych zysków ciepła i przybliżony algorytm działania instalacji. Taki sposób nie musi być zły, bo jak radził Albert Einstein, wszystko powinno być robione jak najprościej, ale nie prościej. Jak przedstawiono powyżej takie modelowanie zachowania jest zbyt uproszczone chociażby w przypadku budynków, które mają być maksymalnie energooszczędne i satysfakcjonujące dla użytkowników. Dlatego na podstawie pomiarów parametrów środowiska wewnętrznego i zewnętrznego, ankietowego i czujnikowego monitoringu zachowania użytkowników oraz badań nad wykorzystaniem czasu przez człowieka (ang. *time use survey*) zaczęto tworzyć różnego rodzaju modele. Bazując na tych danych można np. założyć (w sposób deterministyczny) najbardziej i najmniej korzystny scenariusz zachowań i w ten sposób sprawdzić jakość budynku jako całości.

Inne podejście polega na modelowaniu w oparciu o warunki środowiskowe. Algorytmy zachowań opisują konkretne stany (np. opuszczone/podniesione, włączone/wyłączone) lub zdarzenia (np. zapal/zgaś, otwórz/zamknij) w funkcji parametrów środowiska wewnętrznego i zewnętrznego. Opieranie się na zdarzeniach jest o tyle lepsze, że można uwzględnić histerezę danego zachowania, z kolei oparcie się na stanach, które często zależą od parametrów, na które wpływają, może powodować brak zbieżności w trakcie symulacji.

Trzecia generacja modeli wprowadziła do symulacji rachunek prawdopodobieństwa i statystykę. Bazując na danych pomiarowych trudno nam określić dokładne zależności między działaniami użytkowników a czynnikami wpływającymi na nie, ale mając odpowiednią ilość danych możemy danym zdarzeniom, w danych warunkach przypisać prawdopodobieństwo wystąpienia. W ten sposób modele środowiskowe działają z uwzględnieniem statystyki występowania danych zachowań. Oczywiście wówczas dwie symulacje przy użyciu tego samego modelu prawdopodobnie nie dadzą tego samego wyniku. W ten sposób, powtarzając obliczenia, otrzymujemy coraz lepszy obraz rozkładu prawdopodobieństwa badanego wskaźnika efektywności budynku (np. zużycia energii), który przedstawia jak bardzo różnie może przebiegać eksploatacja obiektu. Najlepszym rozwiązaniem, przy porównywaniu takich rozkładów prawdopodobieństwa, będzie nie to, które ma najlepsze wskaźniki efektywności, ale to, które łączy zadowalające wskaźniki z ich stabilnością (ang. *robust solution*) względem zachowania użytkowników. Tę metodologię stosuje się również w przypadku innych niepewności w założeniach podczas modelowania budynków (np. warunki meteorologiczne).

Obecnie najbardziej zaawansowana jest czwarta generacja modeli, która opiera się na zasadzie programowania agentowego (ABM, z ang. *agent-based model*). Dotychczas algorytmy opierały się na analizie zbioru danych zebranych dla danego budynku/budynków i klimatu, modele ABM uwzględniają różnorodność w zachowaniu pojedynczych użytkowników, opierają się na zbiorach danych dotyczących pojedynczych użytkowników. W ten sposób użytkownik(-cy) i budynek to dwa osobne modele sprzężone ze sobą, które niezależnie są poddawane bodźcom zewnętrznym (klimat) i wzajemnie na siebie oddziałują. Z budynkiem może być sprzężonych wielu agentów, reprezentujących np. rodzinę zamieszkującą dany budynek: każdy użytkownik ma swój własny model poddawany bodźcom zewnętrznym i będący w interakcji z budynkiem, i jego technicznym wyposażeniem, a także rejestrujący istniejące w jego otoczeniu parametry komfortu.

Jak dotąd brak spójności w modelach prezentowanych w literaturze. Różnią się one zarówno metodami obliczeniowymi (np. procesy Bernoulliego, łańcuch Markova), jak i wynikami. Stąd propozycja projektu IEA ECB Annex 66 [5]. Stworzenie wiarygodnych modeli zarówno trzeciej, jak i czwartej generacji wymaga zebrania dużej ilości danych. Tworzone modele powinny być opracowywane wg procedury podwójnej ślepej próby (ang. *double-blind studies*, pomiary, budowę modelu i porównanie pomiarów i przewidywań modelu wykonują trzy różne zespoły) lub algorytmu cyklicznego (ang. *round-robin*

test, badania wykonywane jednocześnie przez różne zespoły, różnymi metodami/narzędziami).

#### LITERATURA

- [1] ITARD L., MEIJER F., *Towards a Sustainable Northern European Housing Stock: Figures, Facts and Future*, IOS Press, 2008, ISBN: 978-1-58603-977-6.
- [2] DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, zmiany dyrektyw 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylecia dyrektyw 2004/8/WE i 2006/32/WE.
- [3] NICOL J.F., *Adaptive comfort*, Building Research and Information, 2005, Vol. 39, p. 105-107.
- [4] FRONTCZAK M., ANDERSEN R.V., WARGOCKI P., *Questionnaire survey on factors influencing comfort with indoor environmental quality in Danish housing*, Building and Environment, 2012, Vol. 50, p. 56-64.
- [5] IEA ECB Annex 66, *Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*, [www.annex66.org](http://www.annex66.org).
- [6] MAHDAVI A., *The human dimension of building performance simulation*, 12<sup>th</sup> Conference of IBPSA, 2011, Sydney, Australia.
- [7] FABI V. i in., *Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models*, Building and Environment, 2012, Vol. 58, p. 188-198.
- [8] WEI S., JONES R., DE WILDE P., *Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings*, Energy and Buildings, 2014, Vol. 70, p. 36-44.
- [9] GUERRA-SANTI O., ITARD L., *Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption*, Building Research and Information, 2010, Vol. 38, p. 318-338.
- [10] GUERRA-SANTI O., *Occupant behaviour in energy efficient dwellings: evidence of rebound effect*, Journal of housing and Built Environment, 2013, Vol. 28, p. 311-327.
- [11] DAR U.I., i in., *Influence of user-behavior on the performance of the building and the supply system: investigation of heating*, 1<sup>st</sup> Simulation and Optimization Conference, 2012, Loughborough, UK.
- [12] MOLIN A., ROHDIN P., MOSHFEGH B., *Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden*, Energy and Buildings, 2011, Vol. 43, p. 2822-2831.
- [13] BLIGHT T., COLEY D.A., *Sensitivity analysis of the effect of occupant behaviour on the energy consumption of passive house dwellings*, Energy and Buildings, 2013, Vol. 66, p. 183-192.
- [14] KORJENIC A., BEDNAR T., *Impact of lifestyle on energy demand of single family house*, Building Simulation, 2011, Vol. 4, p. 89-95.
- [15] HALDI F., ROBINSON D., *The impact of occupants' behaviour on building energy demand*, Journal of Building Performance Simulation, 2011, Vol. 4, p.323-338.
- [16] FABI V. i in., *A methodology for modeling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings*, Building Simulation, 2013, Vol. 6, p. 415-427.

#### IMPORTANCE AND MODELING OF OCCUPANT BEHAVIOR IN RESIDENTIAL MODERN BUILDINGS

The paper consists of: relevance of occupant behavior (OB) for modern buildings, literature review of OBs classification and their driving factors, discussion of OB influence on building energy use, description of OB modeling methods in building performance simulations.