

# "IEA EBC Annex 66- Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings" – aktualne metody modelowania zachowania użytkowników budynku

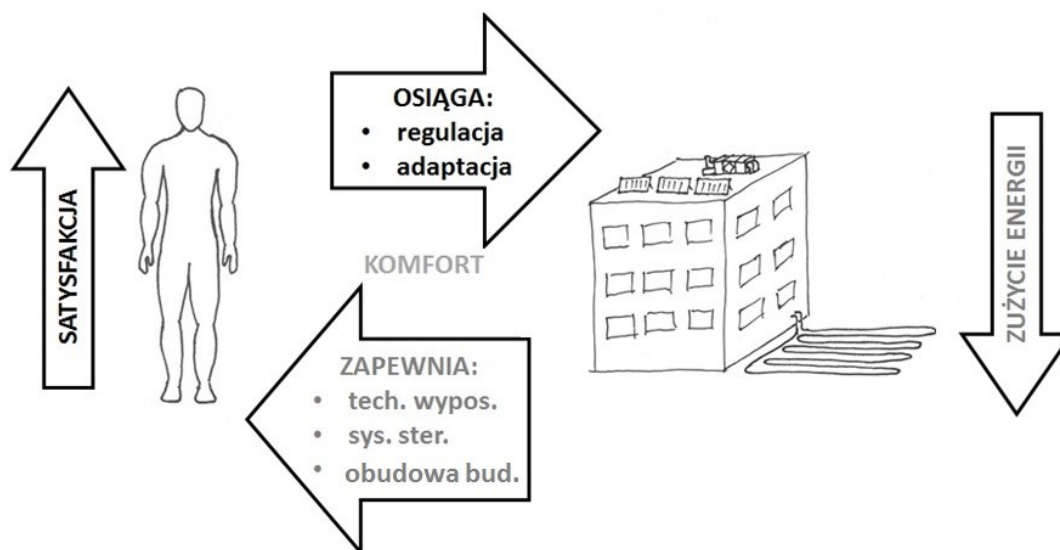
mgr inż. Karol Bandurski, prof. dr hab. inż. Halina Koczyk

**Słowa kluczowe:** modelowanie użytkowników, budynki netto zero energetyczne (nZEB), modelowanie systemów energetycznych

**Streszczenie.** Monitorowanie i modelowanie zachowań użytkowników to bardzo istotne zagadnienie z punktu widzenia zarządzania energią, szczególnie w kontekście koncepcji budynków netto zero energetycznych, czy netto zero emisyjnych. Spojrzenie na te systemy z perspektywy użytkownika, umożliwia tworzenie wierniejszych modeli procesów energetycznych zachodzących w obiektach budowlanych. Modele użytkowników mają znaczenie zarówno w fazie projektowej przedsięwzięć inwestycyjnych (symulacje energetyczne), jak i w trakcie eksploatacji obiektów (systemy sterowania). Celem niniejszego artykułu jest omówienie zagadnienia i przedstawienie wybranych projektów badawczych dotyczących tematyki IEA EBC Annex'u 66.

## 1. WSTĘP

Efektywność energetyczna, ekonomiczna i środowiskowa w całym cyklu życia produktu jest obecnie jednym z najistotniejszych zagadnień w branży budowlanej. Choć ważna jest ona w każdej gałęzi przemysłu i w każdym procesie produkcyjnym, w naszym przypadku dotyczy ona systemu: budynek łącznie z jego technicznym wyposażeniem (B+TWB). Coraz powszechniejszym narzędziem do analizy B+TWB w fazie eksploatacji, w tym kontekście, są programy symulacyjne. Aby przeprowadzona analiza była wiarygodna konieczne jest stworzenie prawidłowego modelu matematycznego badanego obiektu. Model jest zawsze pewnym uproszczeniem rzeczywistości, jego jakość zależy od poprawności przyjętych założeń, a to jest warunkowane właściwym zrozumieniem modelowanych procesów. Najwłaściwszy opis procesów zachodzących w B+TWB można stworzyć patrząc na nie z perspektywy podstawowej funkcji budynku, jaką jest bycie narzędziem do kreowania pożądanego (odpowiedniego) środowiska (pracy, życia...) przez użytkowników, w sytuacji istnienia zmiennego środowiska zewnętrznego (warunków atmosferycznych) [1]. Dlatego symulacja efektywności budynków powinna opierać się na modelowaniu interakcji: człowiek - B+TWB, (Rys. 1).



Rys. 1 Interakcja pomiędzy użytkownikiem a B+TWB [2]

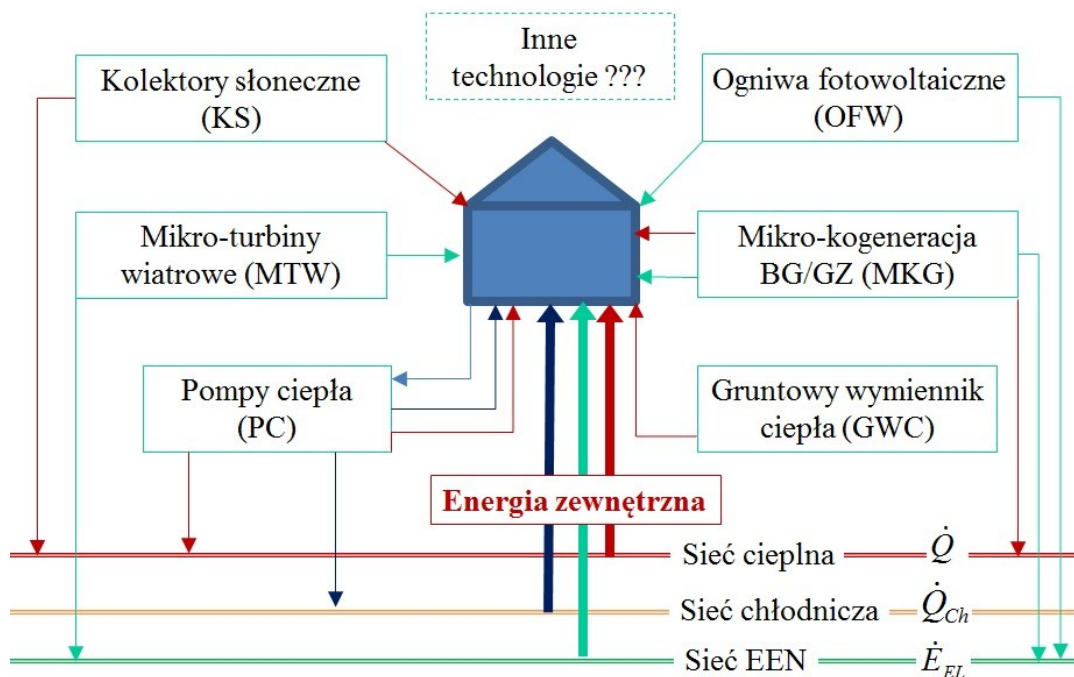
Inne podejście powoduje otrzymywanie błędnych wyników, np. spojrzenie na B+TWB, jako obiekt dostarczający wyłącznie produkt, jakim jest odpowiednie środowisko wewnętrzne, zaniedbuje człowieka jako główną przyczynę procesów w B+TWB, stąd duży rozdźwięk pomiędzy wynikami symulacji budynków a rzeczywistymi wartościami [2], [3].

Niniejszy artykuł ma na celu zaprezentowanie, będącego już w trakcie realizacji, międzynarodowego projektu *Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*, realizowanego jako Annex 66 w programie *Energy in Buildings and Communities (EBC)*, będącego pod auspicjami *Międzynarodowej Agencji Energii (IEA)*. W ramach tego celu zostanie opisane znaczenie tematu w kontekście współczesnych wyzwań branży budowlanej, problemy z jakimi podejmuje się zmierzyć Annex oraz przywołane zostaną przykładowe badania realizowane w tematyce powiązanej z projektem.

## 2. ZNACZENIE DLA ROZWOJU NAUKI I GOSPODARKI

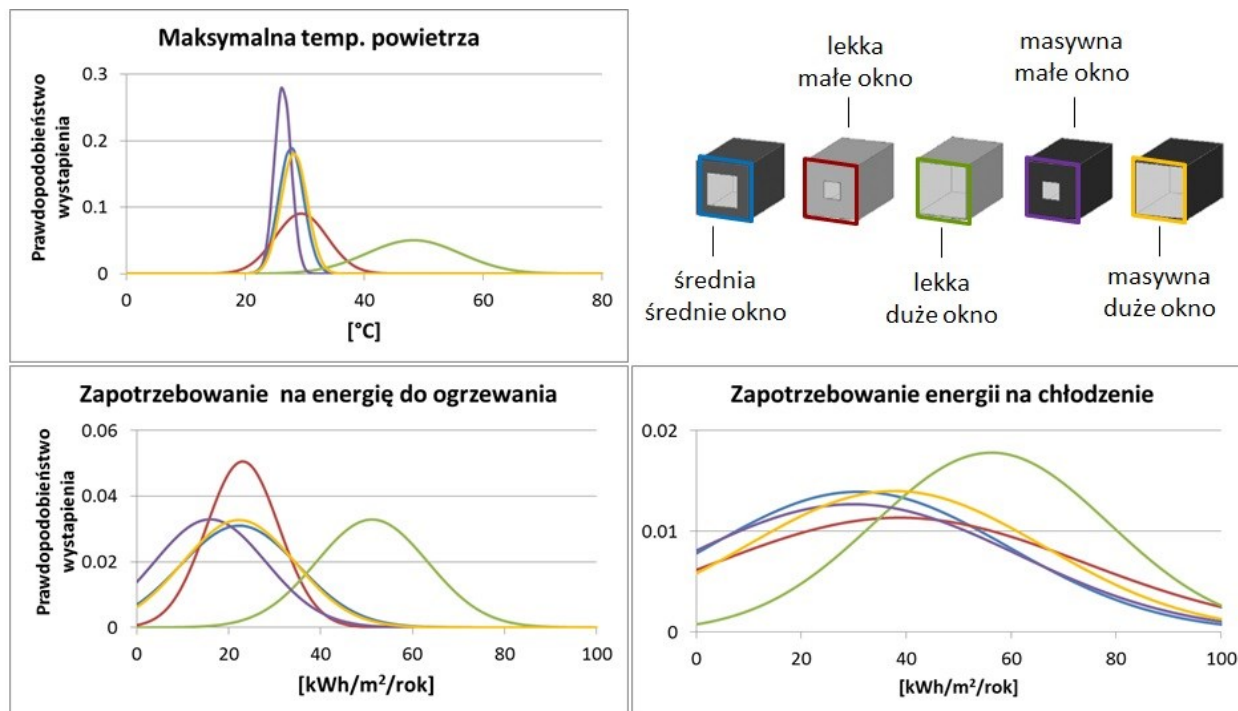
Pomysł Annex'u 66 powstał w trakcie realizacji wcześniejszego projektu: Annex 53 *Total Energy Use in Buildings Analysis and Evaluation Methods* [4]. Okazuje się bowiem, że zachowanie użytkowników jest jednym z najistotniejszych czynników wpływających na zużycie energii przez B+TWB, ale również na jego ogólną efektywność (również w kontekście komfortu środowiska wewnętrznego). Specjaliści często dostrzegają istotne różnice pomiędzy energochłonnością B+TWB wynikająca z symulacji a rzeczywistymi poborami energii. Wynika to zwykle ze zbyt słabego rozpoznania w sposobie użytkowania B+TWB i funkcjonowania użytkowników oraz ze zbyt uproszczonego modelu tych procesów. Stąd konieczne jest zbadanie i odpowiednie modelowanie interakcji użytkownik - B+TWB [5] (a z punktu widzenia administratorów obiektów odpowiednia edukacja mieszkańców [6])

Problem jest jeszcze bardziej naglący z perspektywy budynków netto zero energetycznych (NZEB), (Rys. 2). Ich działanie opiera się na współpracy wielu źródeł energii i wymianie mediów z sieciami energetycznymi. W bilansie rocznym obiekty NZEB pobierają tyle samo lub nieco więcej (mniej) energii niż produkują (i sprzedają do sieci). Dlatego ta koncepcja (lub podobna: netto zero emisyjne – operowanie energią zastąpiono handlowaniem pozwoleniami na emisję) zmienia cel optymalizacji budynków: z minimalizacji zużycia energii na odpowiednie zarządzanie jej przepływem. W takim układzie zachowanie użytkowników, które odpowiada za zużycie energii B+TWB jest bardzo istotne i musi być odpowiednio zamodelowane w celu optymalizacji rozwiązania takich zaawansowanych rozwiązań i stworzenia, integrującego wszystkie elementy, systemu sterowania.



Rys. 2 Schemat działania budynków netto zero energetycznych (NZEB) [7].

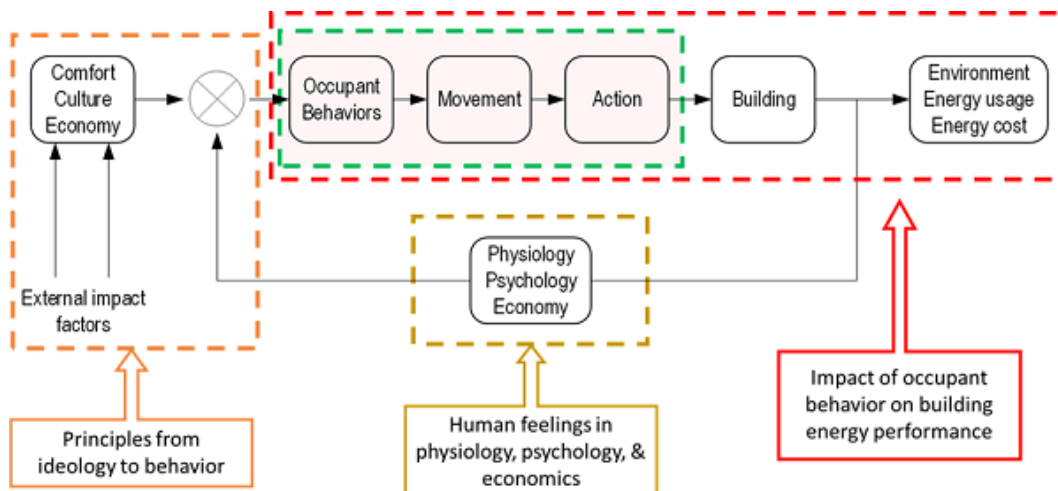
Równoległe z opracowywaniem nowych technologii, zwiększających efektywność energetyczną w budownictwie, konieczne jest stworzenie metody ich analizy, porównywania. Bardzo przydatne są modele symulacyjne. Jednak przyjmowanie założeń zależnych od zachowań użytkowników w sposób deterministyczny [8] prowadzi jedynie do wartości ważnych dla ustalonych warunków. Pełniejsze porównywanie wariantów możliwe jest w przypadku uwzględnienia stochastycznego charakteru wielu czynników wpływających na funkcjonowanie B+TWB: od parametrów urządzeń i materiałów, przez jakość wykonania, po warunki klimatyczne i zachowania użytkowników [9], [10]. Zamodelowanie pewnych wartości wejściowych (zmiennych i stałych) w sposób losowy prowadzi do otrzymania wyników w postaci rozkładu prawdopodobieństwa, zamiast jednej wartości odniesionej do ustalonych założeń. Dzięki temu można porównywać nie tylko poszczególne wskaźniki efektywności [11] danego rozwiązania, ale również ich stabilność w zetknięciu z niepewnościami, jakie mogą mieć miejsce w rzeczywistości.



Rys. 3 Przykładowe wyniki rozkładu prawdopodobieństwa wskaźników efektywności budynku, po uwzględnieniu w symulacji stochastycznego modelu zachowania użytkowników (w prawym górnym rogu opisano warianty pod kątem masywności konstrukcji i wielkości okna) [10].

### 3. CEL, ZADANIA I REALIZATORZY ANNEX’U 66 [3], [5]

W związku z powyższym, po fazie przygotowawczej, za zgodą Komitetu Wykonawczego *IEA EBC* (100% głosów za), w grudniu 2014 r. rozpocznie się dwuletni okres roboczy Annex’u 66 (do grudnia 2016), po którym nastąpi półroczny okres sprawozdawczy (czerwiec 2017). Obszar wiedzy leżący w centrum zainteresowania Annex’u przedstawiono schematycznie na Rys. 4.



Rys. 4 Zakres zainteresowań IEA EBC Annex 66 *Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings* [5].

Projekt jest forum międzynarodowym, na którym mogą się spotkać eksperci zajmujący się tą samą tematyką w różnym kontekście, w różnych miejscach na świecie. Dzięki niemu możliwe będzie opracowanie wspólnej terminologii i metodologii, co ułatwi standaryzację zagadnienia, a tym samym ułatwi planowanie badań i usprawni współpracę w zakresie wymiany danych, weryfikowania modeli i ich stosowania. Zadaniem badawczym projektu są [5]:

- 1) *Opracowanie wytycznych odnośnie zbierania danych, w celu tworzenia modeli użytkowników.*
- 2) *Stworzenie metodologii tworzenia i walidowania modeli użytkowników.*
- 3) *Zintegrowanie modeli użytkowników z programami symulacyjnymi i inne ich aplikacje w branży (np. sterowanie predykcyjne).*

Wśród spodziewanych korzyści z projektu wymienia się:

- *dokładniejsze wymiarowanie systemów i urządzeń,*
- *bardziej niezawodny sposób do oceny budynków energooszczędnych,*
- *bardziej wiarygodne dane dla władz do planowania odpowiedniej polityki,*
- *zorientowanie procesu projektowego i stosowanych technologii bardziej na potrzeby użytkownika,*
- *tworzenie lepszych systemów sterowania.*

Uczestnicy projektu będą działać w pięciu podzadaniach: (A) dotyczy modeli poruszania się i obecności człowieka w budynku, (B) modelowania zachowań użytkowników w budynkach mieszkalnych, (C) w budynkach komercyjnych, (D) integrowania modeli z programami do symulacji energetycznej B+TWB, a (E) zastosowania modeli użytkowników przy projektowaniu i użytkowaniu B+TWB (symulacje, systemy sterowania). Punktami kontrolnymi projektu będą co ok. półroczne spotkania ekspertów biorących udział w pracach. Część osób zaangażowanych w projekcie ma status uczestników, którzy zobowiązują się do pracy w ramach Annex'u, a część pozostaje jedynie obserwatorami, którzy pełnią rolę recenzentów wyników prac. Zaangażowaniem w prace jest zainteresowanych ponad 100 ekspertów z ok. 57 organizacji i 24 krajów.

#### 4. ZACHOWANIA UŻYTKOWNIKÓW – OPIS ZAGADNIENIA

Zachowanie użytkowników budynków jest szerokim zagadnieniem. Aby odpowiednio uwzględnić wpływ człowieka na budynek należy traktować go jako osobny układ pozostający w ciągłej interakcji z B+TWB. Z tej perspektywy można podzielić zachowania użytkowników na te, które wynikają z tej interakcji (środowiskowe), mające na celu osiągnięcie oczekiwanego komfortu środowiska wewnętrznego, jak również te będące, w zdecydowanej mierze,

nieuwarunkowane bodźcami płynącymi z jakości środowiska wewnętrznego, ale raczej związane np. z planem dnia/tygodnia (poza środowiskowe), przynajmniej w odpowiednio funkcjonujących B+TWB (Tab. 1).

Tabela 1 Podział zachowań (akcji) użytkowników ze względu przyczynę.

Środowiskowe	Poza środowiskowe
obecność, aktywność (metabolizm), gotowanie, sprząatanie, suszenie prania, używanie urządzeń elektrycznych, zmiana aranżacji pomieszczenia, pozycja (stojąca/siedząca)	regulacja ogrzewaniem, otwarciem okien, instalacją wentylacyjną, klimatyzacją, zacienieniem*, regulacja oświetleniem,

\*promieniowaniem słonecznym docierającym do wnętrza budynku

Mając już zbiór najistotniejszych zachowań użytkowników (z punktu widzenia jego interakcji z B+TWB), należy określić czynniki, które wpływają na dane zachowania. W przypadku zachowań pozaśrodowiskowych jest to często ustalony harmonogram dnia, albo zwykłe losowe przypadki. Do opracowywania modeli tego typu zachowań wykorzystuje się często badania budżetu czasu ludności (np. ankietowe), które opisują na jakie czynności, kiedy, jak często i jak długo człowiek (o danej charakterystyce) poświęca swój czas [12], [13]. Zachowania środowiskowe wymagają bardziej złożonych badań pomiarowych, które nie tylko uwzględniają monitorowanie czynności (np. otwieranie okien), ale również występujące w tym czasie warunki środowiska wewnętrznego, zewnętrznego i towarzyszące danym zachowaniom motywacje; przykład takich badań przedstawiono w [14]. Ciągłe pełne pomiary środowiskowe są skomplikowanym przedsięwzięciem i mogą być uciążliwe dla osób badanych, dlatego jest ich wciąż mało, albo są one w jakimś stopniu ograniczone (np. brak badania motywacji zachowań lub pytania odnośnie działań realizowanych w dość odległym czasie, np. tydzień).

Kolejnym etapem jest tworzenie modeli, o ich rodzajach napisano w [2]. Najbardziej zaawansowanym i najpełniej oddającym rzeczywistość jest model agentowy, który traktuje użytkownika jako osobny model, obiekt będący w interakcji z B+TWB. Gotowe modele można sprzęgać z symulacjami energetycznymi budynków w celu oceny ich efektywności, ale również korzystać z nich w układach sterowania w trakcie eksploatacji budynków czy tworzyć algorytmy sterowania, które same tworzą takie modele przez „uczenie się” charakterystyki B+TWB i jego użytkowników.

Choć potrzeba badań i modeli wydaje się oczywista, i nikt z ekspertów jej nie podważa, istnieje rozdzwitek w spodziewanych wynikach [5]. Pytanie czy uda się stworzyć uniwersalne modele zachowań, chociażby dla pewnych typowych aplikacji, jest bardzo dyskusyjne. Jak na razie prób walidacji modelu stworzonego dla obiektu A na obiekcie B, nie przedstawiono zbyt wiele [15], a zrealizowane nie dają one jednoznacznej odpowiedzi. Część ekspertów uważa, że zachowania użytkowników tak silnie są związane z kontekstem danego B+TWB, a motywacje z psychologią, że nie możemy traktować ich uniwersalnie i pretendować do opisanie ich matematycznie w postaci procesu przyczyna-skutek. Na drugim biegunie powstałego forum są naukowcy, którzy spodziewają się, że jest w zasięgu naszych możliwości osiągnięcie modeli podobnych w użyteczności do modeli ewakuacji osób z budynku i używanie ich z powodzeniem w analizie B+TWB, a także przy projektowaniu i użytkowaniu układów sterowania. Wspólnym mianownikiem dla tych skrajności i wszystkich zdań pośrodku jest nadzieja na [5]:

- uporządkowanie nowego obszaru badań,
- jego standaryzację,
- opracowanie metod: zbierania danych (pomiarów), modelowania, weryfikacji/oceny modeli,
- rozbudowanie programów symulacyjnych od strony reprezentacji użytkowników,
- utworzenie spójnych baz danych na potrzeby badawcze,

co pomoże spojrzeć na B+TWB w pełniejszy, a tym samym dojrzały, sposób.

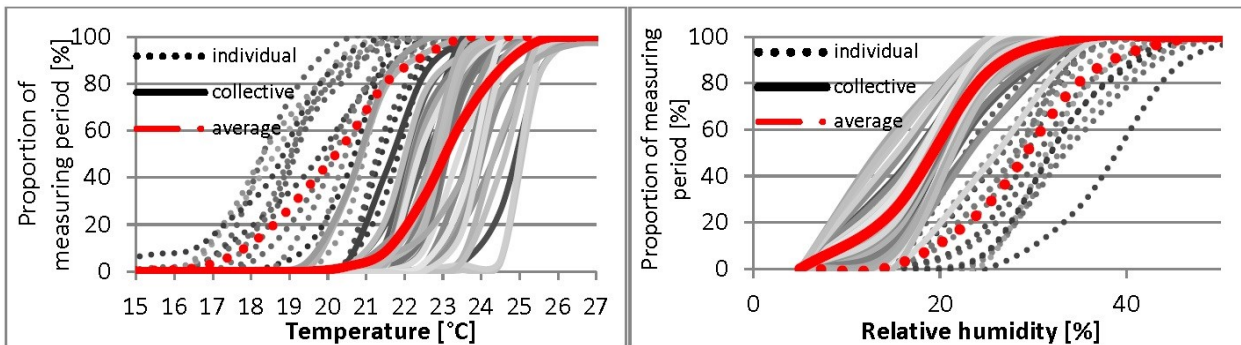
## 5. PRZYKŁADY BADAŃ



Badania dotyczące użytkowników budynków z punktu widzenia ich interakcji z B+TWB są dość szeroko prowadzone na świecie i to w bardzo różnorodny sposób. Poniżej przedstawiono badania zaprezentowane w trakcie pierwszego międzynarodowego sympozjum na temat zachowań użytkowników, które odbyło się w Nottingham (Wielka Brytania) w dniu 4 sierpnia 2014 roku [16]. Spotkanie było podzielone na trzy sesje z prezentacjami oraz ogólną sesję posterów. Pierwsza dotyczyła związków między zachowaniami użytkowników a zużyciem energii przez B+TWB oraz modelowaniem zachowań użytkowników; druga poświęcona była zachowaniom adaptacyjnym użytkowników, ich modelowaniu, integracją modeli z programami symulacyjnymi i analizowaniem wpływu tych zachowań na efektywność energetyczną B+TWB; ostatnie referaty obejmowały tematykę monitorowania użytkowników i sterowania systemami budynku.

Wykład otwierający był prowadzony przez prof. Henrik'a Madsen'a [17], który będąc matematykiem z wykształcenia, zajmuje się modelowaniem różnych procesów związanych z branżą energetyczną i sterowaniem przepływem energii w obiektach opartych na jej magazynowaniu i integracji wielu jej źródeł. Przesłaniem jego wystąpienia było przedstawienie możliwości statystyki przy analizie danych i modelowaniu. Okazuje się, że odpowiednie użycie narzędzi matematycznych pozwala wydobyć takie informacje i tworzyć wiarygodne modele, które bez ich użycia wymagałyby zastosowania dodatkowych mierników. Jedną z konkluzji w kwestii opracowywania i badania nowych technologii było stwierdzenie, że lepszym standardem są budynki zero emisyjne niż budynki zero energetyczne. Analizowanie B+TWB z punktu widzenia emisji zanieczyszczeń wymusza optymalizację wykorzystania OZE i bezpośrednio uwzględnia szkodliwość różnych systemów energetycznych. W przypadku budynków zero energetycznych dążymy do zminimalizowania zużycia energii, a nie odpowiedniego nią zarządzania i produkcji.

W trakcie pierwszej sesji R. K. Andersen [18] zaprezentował wyniki badań dotyczących wpływu informacji zwrotnej o zużyciu energii (kosztach) na zachowania użytkowników. Autorzy analizowali dwa budynki mieszkalne wielorodzinne pod kątem warunków panujących wewnątrz (temperatura i wilgotność). W budynku A (*collective*) rozliczenie zużycia ciepła z dostawcą było zbiorowe, a rachunek był rozdzielany na mieszkańców proporcjonalnie do metrażu lokali. Podczas gdy w budynku B (*individual*) zainstalowano mieszkaniowe liczniki ciepła, które były rozliczane co miesiąc. Okazało się, na podstawie danych i przeprowadzonych ankiet, że informacja o osobistym zużyciu energii (kosztach) była motywacją dla mieszkańców do oszczędzania jej i czasem dopuszczania do warunków niekomfortowych, niezdrowych (zbyt zimno, duszno). Można również zaobserwować, że w przypadku braku bezpośredniego związku między użytkowaniem mieszkania a rachunkiem za energię, mieszkańcy skupiają się na komforcie wewnętrznym (dogrzanie i większa wentylacja) (Rys. 5). Do badań można mieć to zastrzeżenie, że w niedomówieniu pozostało porównanie B+TWB, czyli odpowiedź na pytanie czy ich charakterystyka (wielkość, wielkość lokali, wiek, charakterystyka mieszkańców) mogła mieć również wpływ na wyniki.



Rys. 5 Skumulowany rozkład okresów z daną temperaturą i wilgotnością w badanych mieszkaniach. Na czerwono zaznaczono rozkład średni dla każdego typu budynku (*collective* i *individual*) [18].

Radzeniem sobie z dyskomfortem termicznym w mieszkaniach zajęła się, wraz ze swym zespołem, Stephanie Gauthier [19]. Prezentowane przez nią badania dotyczyły reakcji ludzi na odczucie zimna w trakcie przebywania w domu. Autorzy wybrali oryginalną metodę badawczą: osoby biorące udział w kampanii pomiarowej przez około dwa tygodnie chodziły po domu z naszyjnikiem, na którym wisiał aparat fotograficzny rejestrujący zdarzenia (pierwotne przeznaczenie przyrządu to pomoc osobom chorym na Alzheimera). Po okresie monitorowania zachowań

użytkowników przeprowadzano ankietę dotyczącą zachowań w przypadku odczucia dyskomfortu termicznego w minionym okresie. Okazało się, że deklarowane akcje (ankieta) nie pokrywały się z rzeczywistymi (wynikającymi ze zdjęć). Ważną uwagę w kontekście tego wystąpienia, i ogólnie badań polegających na monitoringu, zgłosił prof. Ardeshir Mahdavi: osoby obserwowane zachowują się inaczej niż zwykle.

Ciekawe spojrzenie przedstawił również Boris R. M. Kingma [20], który na co dzień zajmuje się badaniem termoregulacji człowieka i komfortem cieplnym z punktu widzenia fizjologii. Kingma przedstawiając wyniki swoich badań, m. in. zależności parametrów fizjologicznych (np. temperatury skóry w różnych miejscach) od odczucia komfortu, postulował włączenie modelu termo-fizjologicznego człowieka w modelowaniu zachowań użytkowników w budynkach. Takie podejście miałyby opierać się na trzech modułach:

- 1) model dynamiki cieplnej ciała ludzkiego,
- 2) profil użytkownika, który opisywałby:
  - a. prawdopodobieństwo potrzeby zmiany środowiska termicznego w funkcji stanu termicznego ciała ludzkiego,
  - b. prawdopodobieństwo przeprowadzenia którejś z akcji zmierzającej do zmiany panujących warunków termicznych,
- 3) symulację budynku, która uwzględnia panujący klimat zewnętrzny i przepływ energii w ramach B+TWB.

Styk modułów 1) i 2) byłby punktem kontaktowym ekspertów od dynamiki ciała ludzkiego i ekspertów od środowiska wewnętrznego oraz dynamiki B+TWB. Koncepcję dobrze byłoby uzupełnić o modele opisujące organizm ludzki w funkcji jakości powietrza wewnętrznego i np. oświetlenia, które też mają wpływ na percepcję warunków środowiska i tym samym na interakcję z B+TWB. Jakość powietrza jest tym bardziej istotna w analizie, że w przeciwieństwie do komfortu termicznego, jej niski poziom jest mniej dokuczliwy dla mieszkańców w momencie kontaktu, a jej wpływ na zdrowie ujawnia się z opóźnieniem.

Oświetlenie środowiska wewnętrznego było przedmiotem referatu wygłoszonego przez Marije te Kulve [21], która jest członkiem tej samej grupy badawczej co Kingma. Kulve prowadzi badania weryfikujące hipotezę mówiącą, że odczucie komfortu cieplnego i termoregulacja organizmu ludzkiego są zależne również od oświetlenia. Prezentowane wyniki dotyczyły eksperymentu z oświetleniem LED. Wyniki zdawały się potwierdzać zależność odczucia ciepła od oświetlenia. Jeżeli zjawisko okaże się prawdziwe, będzie to kolejny argument za bardziej zintegrowanym spojrzeniem na środowisko wewnętrzne i optymalne zużycie energii. W dalszych planach Kulve jest analiza omawianej zależności w funkcji intensywności oświetlenia i jego barwy (długości fali).

Przykład opracowywania modelu użytkowników zaprezentował Xiaohang Feng [22], doktorant prof. Da Yana (szefa IEA EBC Annex 66). Bazując na pomiarach z okresu letniego obejmujących: parametry środowiska wewnętrznego i zewnętrznego, użytkowanie okien i klimatyzacji, zużycie energii oraz badaniach ankietowych: motywacje działań i czynniki wpływające na nie, przeprowadzono analizę danych i stworzono model użytkowania okien i klimatyzacji. Model zwalidowano z powodzeniem przez zaimplementowanie go do symulacji budynku. W tym przypadku dane ankietowe i pomiarowe, wzajemnie się uzupełniające, pozwoliły na rozwinięcie matematycznego opisu uwzględniającego najistotniejsze czynniki wpływające na zachowania. Jednak należy zwrócić uwagę na małą różnorodność materiału badawczego (tylko dwa gospodarstwa domowe brały udział w pomiarach)

Zastosowanie modeli użytkowników w analizie symulacyjnej budynków było podejmowane przez kilku prelegentów. Tianzhen Hong z LBNL [23] zwrócił uwagę na potrzebę opracowania metodologii obróbki i analizy danych w celu zrozumienia zależności pomiędzy zachowaniami użytkowników a zużyciem energii przez B+TWB. Po pierwsze ważne jest, mając dane, wydobycie tych punktów, które wiążą się z wpływem użytkowników, a nie innymi czynnikami na zużycie energii. Po drugie należy wybrać skuteczne statystyczne narzędzia oraz sposób eksploracji danych, które pomogą na znajdowanie istniejących korelacji. Dyskusja nad różnymi technikami i tworzenie metodologii tego zagadnienia jest przedmiotem badań autorów referatu. Jacob Chapman [24] zaprezentował przykład agentowego modelu użytkowników, który zintegrował z programem symulacyjnym. Model Chapman'a i in. uwzględniał obecność, aktywności, metaboliczne zyski ciepła oraz używanie okien (otwieranie i zasłanianie). W planach jest uzupełnienie modelu o inne aspekty (np. komfort adaptacyjny, różne archetypy

użytkowników). Ciekawostką jest jednak fakt, że prezentowane przykładowe wyniki symulacji nie wykazywały większego zużycia energii niż w przypadku porównywanego modelu deterministycznego. Zespół Rutgers University [25] zaprezentował porównanie wyników symulacji energetycznej przy zastosowaniu modeli użytkowników o różnej szczegółowości: (a) deterministyczny (konwencjonalny), (b) uwzględniający szczegółowo profil użytkownika, (c) biorący pod uwagę zachowania użytkowników z uwagi na zmianę warunków komfortu. Okazało się, że model konwencjonalny często daje wyniki niedokładne, z kolei uwzględnienie bardziej szczegółowych danych w symulacji czasem zwiększa jej dokładność, zachowania adaptacyjne włączone w model nie mają wpływu na dokładność symulacji energetycznej, ale mogą mieć wartość przy analizie satysfakcji użytkowników i użyteczności obiektu. Kolejny w temacie porównywania modeli, był referat wygłaszany przez William'a O'Brien'a [26]. Prezentowane badania dotyczyły sprawdzenia czy wybór modelu zachowań użytkowników (w tym przypadku odnośnie używania zaciemnienia i oświetlenia w biurze) do podejmowania decyzji projektowych może mieć wpływ na ich efekt. Porównywano modele o podobnej złożoności. Pokazano, że modele często tak bardzo są uzależnione od kontekstu w jakim powstawały, że dają bardzo różne wyniki (różne decyzje projektowe), stąd potrzeba ujednoczenia metodologii i standaryzowania tych zagadnień, w celu uniknięcia błędów przy doborze modelu do symulacji i podejmowaniu decyzji projektowych. Ważną uwagę do całego zagadnienia modelowania zachowań użytkowników zgłosił w trakcie swojego referatu prof. Ardeshir Mahdavi [27], który zajmuje się monitorowaniem użytkowników budynków od dłuższego czasu. Opis matematyczny użytkowników budynku (ich działań i obecności) może mieć dwa główne zastosowania: uwzględnienie czynnika ludzkiego w analizie symulacyjnej B+TWB i wykorzystanie w sterowaniu predykcyjnym. W obydwu przypadkach są różne oczekiwania wobec modeli. Przy analizie symulacyjnej liczy się końcowy efekt (skumulowany): jaka i z jakim rozkładem prawdopodobieństwa będzie efektywność B+TWB, a właściwie jej wskaźniki (roczne zużycie energii, ilość godzin z dyskomfortem itp.). W przypadku sterowania predykcyjnego ważne jest zrozumienie prawidłowości procesów, które funkcjonują w danym obiekcie, poznanie ich charakterystyki/specyfiki. Wówczas można albo uwzględnić je w algorytmie sterowania albo uzupełnić algorytm o procedurę uczenia/dostrzegania tych prawidłowości i procesów. Bazując na modelu B+TWB, danych pogodowych (i ich prognozie) oraz takich algorytmach, system sterowania mógłby optymalizować funkcjonowanie obsługiwanego obiektu. Walidacja modeli do analizy symulacyjnej wymaga jedynie porównania zagregowanych wyników symulacji i rzeczywistych wartości wskaźników. Z kolei modele do celów sterowania można zweryfikować jedynie przez sprawdzenie czy algorytmy oparte na danych z jednego okresu poprawnie przewidują zdarzenia w innym okresie.

Mimo wielu badań w zakresie monitorowania zachowań użytkowników w budynkach, na Sympozjum przedstawiono praktycznie tylko dwa projekty. DANCER [28] (realizowany przez London South Bank University) dotyczy analizy zużycia energii w mieszkaniach i obecności użytkowników w poszczególnych pomieszczeniach w czasie. Jego celem było powiązanie tych dwóch danych ze sobą w taki sposób, aby stworzyć model zwyczajów użytkowników i powiązanego z tym zużycia energii, ostatecznie model miałby przewidywać jakie czynności będą wykonywane przez użytkowników i dzięki temu kontrolować urządzenia zasilane elektrycznie (włącz/wyłącz). Drugi projekt prowadzony w Szkocji (University of Strathclyde i Heriot Watt University) [29], [30] analizował zachowania/obecność osób starszych w domu w kontekście zużycia energii. Celem było stworzenie pomocnych narzędzi dla osób w zaawansowanym wieku, czasem schorowanych, w racjonalnym – energooszczędnym użytkowaniu mieszkania.

## 6. PODSUMOWANIE

Obserwacja, analiza i modelowanie zachowania użytkowników i ich wpływu na efektywność B+TWB jest szeroko badanym zagadnieniem. Jego znaczenie wydaje się być doceniane zarówno w różnych częściach świata jak i w różnych środowiskach (naukowych, przemysłowych, projektowych). Dyskutowane i rozwijane strategie i technologie minimalizacji wpływu człowieka na środowisko naturalne czy eksploatację złóż potrzebują solidnych narzędzi do ich analizy i oceny. Pierwsze próby opisanego zagadnienia już podjęto, okres pierwszej ekscytacji powoli mija. Obecnie zarysowują się wyzwania, które należy podjąć ogólnosiątkowym wysiłkiem, w celu uczynienia wyników prac bardziej użytecznymi i uniwersalnymi. Z jednej strony istnieje potrzeba dopracowania metodologii zbierania danych i ich zakresu. Zgodnie z ustaleniami należy przeprowadzać kolejne kampanie pomiarowe, które będą uwzględniały zarówno parametry środowiska (wewnętrznego i zewnętrznego), zużycie energii, zachowania użytkowników jak i motywacje, komfort, termoregulację czy ogólne funkcjonowanie organizmu. Z drugiej strony należy jasno określić i zdefiniować różne zastosowania modeli (symulacje, sterowanie predykcyjne,...), opracować



metody eksploracji i analizy danych pod tym kątem oraz dobrać odpowiednie narzędzia matematyczne do tworzenia aplikacji, które będą użyteczne w przemyśle czy podczas procesu projektowania albo eksploatacji budynku. Warto też podjąć wspólne wysiłki w tej tematyce na gruncie polskim.

### Literatura

- [1] F. Nicol and F. Stevenson, "Adaptive comfort in an unpredictable world," *Build. Res. Inf.*, vol. 41, no. 3, pp. 255–258, Jun. 2013.
- [2] K. Bandurski and H. Koczyk, "Zachowanie użytkowników współczesnych budynków mieszkalnych – znaczenie i modelowanie," in *2014 Air, Heat & Energy in Buildings*, 2014, pp. 337–342.
- [3] "IEA EBC Annex 66 Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings." [Online]. Available: <http://www.annex66.org/>.
- [4] "IEA EBC Annex 53 Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods." [Online]. Available: <http://www.iea-ebc.org/projects/completed-projects/ebc-annex-53/>.
- [5] "IEA EBC Annex 66 - Newsletter No.1."
- [6] C. A. Pieńkowski, "Wpływ wentylacji na kształtowanie kosztów ogrzewania mieszkań w budynkach dobrze izolowanych," *Ciepłownictwo, Ogrzew. Went.*, no. 10, pp. 53–54, 2008.
- [7] T. M. Mróz, "Efektywność energetyczna źródłem innowacyjnego rozwoju energetyki obywatelskiej," in *seminarium eksperckie: „Energetyka obywatelska na rzecz lokalnego rozwoju gospodarczego”*.
- [8] K. Bandurski and H. Koczyk, "Analiza symulacyjna parametrów komfortu cieplnego i zapotrzebowania na energię dla wybranych rozwiązań wentylacji mieszkania – cz. 1 założenia modelu," *Ciepłownictwo, Ogrzew. Went.*, vol. 44, no. 2, pp. 70–74, 2013.
- [9] I. A. Macdonald, "Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation," University of Strathclyde, 2002.
- [10] P. Hoes, J. L. M. Hensen, M. G. L. C. Loomans, B. de Vries, and D. Bourgeois, "User behavior in whole building simulation," *Energy Build.*, vol. 41, no. 3, pp. 295–302, Mar. 2009.
- [11] J. L. M. Hensen and E. Djunaedy, "Jak niewidzialne uczynić widzialnym - zastosowanie symulacji budynku na przykładzie przepływów powietrza," in *Energooszczędne kształtowanie środowiska wewnętrznego*, 2005, pp. 312–324.
- [12] *Budżet czasu ludności I VI 2003 - 31 V 2004*. Warszawa: Główny Urząd Statystyczny, 2005.
- [13] J. Widén, M. Lundh, I. Vassileva, E. Dahlquist, K. Ellegård, and E. Wäckelgård, "Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data—Modelling approach and validation," *Energy Build.*, vol. 41, no. 7, pp. 753–768, Jul. 2009.
- [14] M. Schweiker, "Occupant Behaviour and the Related Reference Levels for Heating and Cooling," Tokyo City University, 2010.
- [15] M. Schweiker, F. Haldi, M. Shukuya, and D. Robinson, "Verification of stochastic models of window opening behaviour for residential buildings," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 5, no. 1, pp. 55–74, 2012.

- [16] "Symposium on Occupant Behaviour: OB-14 and Annex 66." [Online]. Available: <http://www.nottingham.ac.uk/research/groups/environmental-physics-and-design/ob-14-and-annex-66/index.aspx>.
- [17] H. Madsen, "Crystal ball techniques: illustrating the power of statistical modelling," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [18] R. K. Andersen, S. Andersen, and B. W. Olesen, "Effect of individual and collective heat cost allocation on indoor environment in Danish apartments," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [19] S. Gauthier, D. Shipworth, and G. M. Huebner, "Investigating people's cold thermal discomfort responses in buildings," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [20] B. R. M. Kingma and W. D. van Marken Lichtenbelt, "Simulating Human Occupant Thermal Behavior: a framework based on human thermophysiology," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [21] M. te Kulve, L. Schellen, A. Frijns, L. J. M. Schlangen, and W. D. van Marken Lichtenbelt, "Dynamic LED lighting, thermal comfort, health, and energy savings in buildings," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [22] X. Feng and D. Yan, "Occupant Behaviour Modelling on Air-Conditioning and Window Operation in Residential Buildings," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [23] S. D'Oca and T. Hong, "Data Mining of Occupant Behavior: Windows Opening and Closing in Office Buildings," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [24] J. Chapman, P.-O. Siebers, and D. Robinson, "Multi-agent stochastic simulation of buildings' energy performance," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [25] C. J. Andrews, H. C. Putra, M. Figueroa, and K. Xu, "Value Added by Incorporating Occupant Behavior into Building Energy Models," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [26] W. O'Brien and H. B. Gunay, "Influence of window blind and light use occupant model selection on design decisions," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [27] A. Mahdavi and F. Tahmasebi, "Deployment of probabilistic occupancy models in building operation," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [28] J. Liao, L. Stankovic, V. Stankovic, B. Stephen, and S. Galloway, "Human Behaviour Model Combining Multiple Sensors," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [29] J. Liao, L. Stankovic, V. Stankovic, B. Stephen, and S. Galloway, "Reasoning daily activities in elderly homes based on energy monitoring," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014.
- [30] J. Chaney, B. Stephen, E. Owens, and S. Galloway, "Quantifying Building Utilization in Sheltered Accommodation for the Elderly through improved Occupancy Sensing," in *OB-14 Symposium on Occupant Behaviour, 4th of August, 2014*, 2014, no. June.

## **IEA EBC Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings – why investigate and model occupant behavior?**

**Key words:** occupant behavior modeling, net zero energy buildings, modeling of energy systems

**Summary - krótkie:** One of the newest concepts of building: net zero energy/emission buildings (NZEB) base building supply side on many energy sources (e.g. renewable and district). The quality of this solution depends on building energy system management. Development of robust energy systems and NZEB require taking into account stochastic character of both supply and demand sides. In this way system performance will be tested against reality related uncertainty. Therefore model of occupant behavior is important both in design phase and during building operation. The design phase is the least expensive period to change building concept, based on results of building performance simulation analysis where appropriate occupant model should be implemented. Building operation is based on control system strategy; it is based on appropriate models of object control: building, building systems and user. The aim of this paper is to describe Annex 66 project and present selected research projects on the subject.

**Summary:** International Energy Agency has established the Energy in Buildings and Communities Program (EBC). The Program's aim is investigation of energy related issues in building industry. EBC Program consists of Annexes that are established to carry out research on specific subject problems. The paper presents one of the newest Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings that deals with modeling of occupant behavior in buildings. Annex 66 topic is a very important issue because of world-wide need to reduce energy production related with harmful gas emission. One of the newest concepts of building: net zero energy/emission buildings (NZEB) base building supply side on many energy sources (e.g. renewable and district). The quality of this solution depends on building energy system management. Development of robust energy systems and NZEB require taking into account stochastic character of both supply and demand sides. In this way system performance will be tested against reality related uncertainty. Buildings are not comfort environment suppliers, but tools for occupants to create a desirable comfort environment. Therefore modeling energy processes in buildings becomes also more accurate if the problem is considered from an occupant's perspective. Model of occupant behavior is important both in design phase and during building operation. The design phase is the least expensive period to change building concept, based on results of building performance simulation analysis where appropriate occupant model should be implemented. Building operation is based on control system strategy. Model Predictive Control is the youngest generation of control algorithms; they are based on appropriate models of object control: building, building systems and user. The aim of this paper is to describe Annex 66 project and present selected research projects on the subject.

**Karol Bandurski**, mgr inż., asystent w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, e-mail: [karol.bandurski@put.poznan.pl](mailto:karol.bandurski@put.poznan.pl), [www.put.poznan.pl/~karol.bandurski](http://www.put.poznan.pl/~karol.bandurski)

**Halina Koczyk**, prof. zw. dr hab. inż., zastępca dyrektora Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej d/s naukowych