

Komputerowa symulacja energetyczna budynków

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Kuczyński, dr inż. Piotr Ziembicki, dr inż. Grzegorz Misztal, dr hab. inż. Grzegorz Benysek, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

Rozwój nauki i techniki oraz postęp społeczno-gospodarczy wymuszają rozwiązywanie coraz bardziej skomplikowanych problemów technicznych. Każdy z nich wymaga pełnego zrozumienia badanego procesu czy systemu. Jednak w wielu przypadkach poziom wiedzy nie daje możliwości jednoznacznego ich określenia, a często nie pozwala stworzyć ścisłych metod obliczeniowych.

Podobnie jest w zakresie analizy energetycznej budynków, które będąc skomplikowanymi układami współpracujących ze sobą elementów i instalacji muszą zapewnić odpowiednie środowisko do życia i pracy ich użytkownikom, funkcjonując w zróżnicowanych, często niedających się przewidzieć warunkach.

Aby minimalizować zużycie energii, trzeba znać charakterystykę energetyczną budynku wynikającą z jego cech konstrukcyjnych oraz profilu wykorzystania. W rzeczywistości informacje te są trudne do pozyskania w trakcie analizy obiektu czy jego inwentaryzacji, ponieważ często opis systemu nie istnieje, a dokumentacja budowlana jest nieaktualna lub niekompletna.

Rozwiązaniem tego problemu jest prowadzenie identyfikacji systemu, jakim jest budynek, poprzez budowanie komputerowych modeli symulacyjnych oraz ich kalibrację przy wykorzystaniu danych pomiarowych pozyskanych w trakcie eksploatacji budynku.

Zagadnienia symulacji energetycznej budynków rozwijane są od ponad 40 lat, co zaowocowało powstaniem znacznej liczby programów komputerowych o zróżnicowanych funkcjonalnościach i stopniu skomplikowania, od arkuszy kalkulacyjnych do specjalistycznych narzędzi symulacyjnych (np. EnergyPlus), łączących różne aspekty projektowania budowlanego [13].

2. Modelowanie i symulacja

W literaturze pojęcie modelu definiuje się na wiele sposobów, jednak na potrzeby niniejszej pracy przyjęto definicję podaną przez Krupę [8], określającą model jako zbiór zmiennych i relacji występujących między nimi, które są przedstawiane jako równanie lub układ równań. Gutenbaum [7] dodatkowo sprecyzował cele, dla których budowane są modele systemów. Podstawowe z nich to:

- opis i wyjaśnienie działania systemu,
- przewidywanie zachowania się systemu w przyszłości i przy różnorodnych warunkach oddziaływania otoczenia,
- wybór właściwych oddziaływań wejściowych, spełniających określone warunki, w szczególności wybór oddziaływań optymalnych,
- wybór struktury lub parametrów systemu spełniającego określone zadania.

Oprócz powyższego modelu matematycznego, Stark i Nicholls [12] wyróżnili jeszcze dwa typy modeli:

- fizyczne – będące repliką badanego systemu wykonaną w skali pozwalającej ująć i przedstawić

najważniejsze cechy układu oryginalnego,

– analogowe – opierające się na analogii w wąskim sensie, czyli zgodności wielkości modelowanych i modelujących, które podlegają prawom opisanym przez identyczne zależności matematyczne.

Według Malinowskiego [9] stopień szczegółowości modelu pozostaje jednym z najważniejszych elementów branych pod uwagę podczas jego budowy i weryfikacji. Można stwierdzić, że im jest on większy, tym bardziej model jest realistyczny, a wyniki symulacji upodobniają się do rzeczywistości. Z praktyki wiadomo jednak, że rozsądne wprowadzenie ograniczeń co do szczegółowości modelu jest uzasadnione zarówno ekonomicznie, jak i technicznie.

Według Nelles'a [10], identyfikacja systemu uwzględniająca liczne szczegóły wymaga dużo wysiłku i czasu, co oznacza wzrost kosztów, który musi być uzasadniony wagą problemu. Dodatkowo, wraz z uruchomieniem szczegółowego modelu rosną koszty jego oprogramowania oraz wydłuża się czas przebiegu programu. Wzrastają również koszty testowania, zwiększa się liczba danych oraz trudności w manipulowaniu cechami systemu. Często zdarza się, iż wykorzystanie symulacji komputerowej pozwala na otrzymanie zadowalających wyników już po pierwszym jej przebiegu, a wprowadzenie do modelu dalszych szczegółów nie powoduje poprawienia ich jakości. Unikanie takich przypadków pozwala na skrócenie czasu przygotowania i przebiegu symulacji.

Według Krupy [8], równania modelowe można rozwiązać analitycznie, numerycznie lub poprzez symulację. Ostatni ze sposobów ma tę cechę, że zmiennymi niezależnymi modelu są zawsze zmienne odpowiadające wielkościom wejściowym systemu rzeczywistego. Dzięki temu dokonywany w komputerze „eksperyment” pod względem strukturalnym odpowiada ściśle eksperymentowi na systemie rzeczywistym.

Symulacja może „skondensować” czas w takim stopniu, że istnieje możliwość symulowania kilku lat działania systemu w ciągu bardzo krótkiego czasu. Pozwala również na „rozszerzenie” czasu działania układu, co daje możliwość zbadania szczegółowej struktury zmian w realnym systemie, których nie można byłoby zaobserwować w czasie rzeczywistym. Według Findensein'a [4], kolejnymi zaletami symulacji, jako metody rozwiązywania równań modelowych jest:

- zdolność do odtwarzania stanu systemu,
- możliwość identyfikacji i kontroli źródeł jego zmienności,
- powtarzalność eksperymentu.

Technicznie istotne zalety symulacji komputerowej pozwalają na eksperymentowanie, sprawdzanie i porównywanie nowych systemów lub też na proponowanie wprowadzenia zmian do systemów istniejących. Metoda ta umożliwia również badanie systemów hipotetycznych, których wypróbowanie w jakikolwiek sposób byłoby niebezpieczne lub niemożliwe.

Jednym z ważniejszych etapów konstruowania modelu jest jego weryfikacja, czyli porównanie wyników modelowania z zachowaniem się systemu rzeczywistego. Proces ten jest integralnie związany z każdym z etapów budowy modelu, a więc powinien odbywać się nie tylko po zakończeniu całej pracy, ale we wszystkich fazach jego tworzenia [16].

Ocena zgodności modelu zależy m.in. od przeznaczenia oraz wymagań stawianych wynikom

jego działania. Gutenbaum [7] twierdzi, iż w zależności od kryteriów, na bazie których będzie dokonywana weryfikacja modelu, można ocenić czy zachowana jest zgodność:

- formalna, zapewniająca brak sprzeczności koncepcyjnych, logicznych i matematycznych,
- algorytmiczna, zapewniająca pełne określenie matematyczne relacji tworzących model,
- pragmatyczna, zapewniająca zgodność modelu z danymi doświadczalnymi.

Z punktu widzenia niniejszej pracy, istotna jest zgodność pragmatyczna dotycząca bezpośrednio wyników modelowania. Jej stwierdzenie wymaga przede wszystkim porównania wielkości wyjściowych modelu i systemu modelowanego przy tych samych warunkach oddziaływania z zewnątrz na system i model.

Należy podkreślić, iż nie powinno się oczekiwać pełnej identyczności wyjść modelu i systemu. Wynika to między innymi z faktu, iż model wyraża nie wszystkie, lecz jedynie istotne cechy systemu, przy czym to co jest uznane za istotne, zależy od celów modelowania. Ponadto, na ogół nie są znane dokładne stany wszystkich wejść systemu. O tym, czy zaobserwowane różnice między wyjściami modelu i systemu pozwalają na jego użytkowanie, decydują wyniki testów zgodności, których konkretna treść zależy od przeznaczenia modelu.

3. Oprogramowanie symulacyjne

Postęp w dziedzinie informatyki, szczególnie w zakresie tworzenia i implementacji algorytmów obliczeniowych, a także rozwój dostępnych środowisk programistycznych i ciągłe zwiększanie możliwości obliczeniowych komputerów zaowocowały powstaniem ogromnej liczny aplikacji komputerowych przeznaczonych do analizy i symulacji energetycznej budynków.

Złożoność programów oraz ich przeznaczenie i możliwości obliczeniowe są bardzo zróżnicowane. Wykorzystanie najprostszych programów (np. Audytor OZC, Instal OZC) pozwala na wykonanie bilansu energetycznego budynku, polegającego na obliczeniu zapotrzebowania na moc grzewczą, w oparciu o obowiązujące normy i rozporządzenia. Zastosowanie bardziej skomplikowanych narzędzi, np. Arcadia TERMO, Certo czy BuildDesk Energy Certificate pozwala na wykonanie certyfikatu energetycznego obiektu, będącego precyzyjną informacją o stanie energetycznym budynku uwzględniającą nie tylko jego aspekty konstrukcyjne, ale również zabudowane instalacje.

Najbardziej złożoną i jednocześnie pozwalającą na wykonanie najbardziej szczegółowej analizy energetycznej budynku jest grupa aplikacji symulacyjnych uwzględniających, w sposób kompleksowy, wszystkie elementy budynku mające wpływ na jego charakterystykę energetyczną. Narzędzia te pozwalają na prowadzenie symulacji z minimum godzinnym krokiem czasowym, w oparciu o bardzo szczegółowo zdefiniowane m.in.:

- konstrukcję budynku wraz ze szczegółową informacją o elementach wpływających na zużycie energii, np. strefa klimatyczna, strefa wietrzności, ostłonięcia okien, zacielenia, ostłonięcie przez inne objekty itd.

- sposób jego wykorzystania (mieszkalny, biurowy, użyteczności publicznej),
- charakterystykę mieszkańców lub użytkowników,
- wyposażenie budynku (np. liczba komputerów, standard wyposażenia węzłów sanitarnych itd.),
- instalacje wewnętrzne (m.in. grzewcze, wentylacyjne, klimatyzacyjne, elektryczne, technologiczne i inne),
- instalację oświetlenia budynku,
- sposób przygotowania i charakterystykę zużycia ciepłej wody użytkowej,

– zyski ciepła od wyposażenia biurowego, rtv, agd itd.

W nowoczesnym oprogramowaniu symulacyjnym coraz częściej implementowane są również możliwości prowadzenia analiz CFD (Computational Fluid Dynamics), które dzięki dyskretyzacji i numerycznemu rozwiązaniu cząstkowych równań różniczkowych opisujących przepływ, umożliwiają przybliżone wyznaczenie rozkładu prędkości, ciśnienia, temperatury i innych parametrów w pomieszczeniu.

Zestawienie ważniejszych programów zawarto w katalogu [14], który zawiera informacje o 392 aplikacjach w zakresie oceny efektywności energetycznej, odnawialnych źródeł energii i zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Narzędzia przeznaczone do analizy energetycznej budynków, wymienione w tym katalogu, obejmują bazy danych, arkusze kalkulacyjne oraz systemy przeznaczone do symulacji energetycznej. W zestawieniu zawarto krótki opis każdego z nich, wraz z informacjami, dotyczącymi koniecznych do wprowadzenia danych obiektów, definicją interfejsu danych wejściowych i wyjściowych, wymaganej platformy systemowej, wykorzystanego języka programowania, mocnych i słabych stron, a także danych kontaktowych do autorów oprogramowania [14].

Szczegółowe analizy poszczególnych narzędzi symulacyjnych zawarto w wielu publikacjach, zarówno krajowych jak i zagranicznych, m.in. w: [1], [5], [11], [13], [15].

4. EnergyPlus

EnergyPlus powstał w oparciu o programy BLAST rozwijany przez U.S. Department of Defense i DOE-2 tworzony przez U.S. Department of Energy. Obie wymienione aplikacje we wcześniejszych wersjach były przeznaczone do obliczania zapotrzebowania ciepła i dedykowane dla architektów i inżynierów zajmujących się pro-

jektowaniem, modernizacją, analizą kosztów i optymalizacją zużycia energii w budynkach i instalacjach HVAC. Zarówno BLAST, jak i DOE-2 realizowały te same zadania jak również były przeznaczone dla tej samej grupy docelowej, a ich rozwój był finansowany z pieniędzy rządowych. Zatem pod koniec lat 90 podjęto decyzję o zakończeniu prac nad programami i połączeniu zespołów programistów i podjęciu prac nad jednym programem łączącym algorytmy i cechy obu aplikacji – stworzono oprogramowanie pod nazwą EnergyPlus.

Podobnie jak jego poprzednicy, EnergyPlus jest oprogramowaniem przeznaczonym do analizy energetycznej budynku, rozbudowanym o możliwości szczegółowej symulacji obciążenia cieplnego i rocznego zużycia energii. Użycie EnergyPlus pozwala, w oparciu o szczegółowy opis obiektu, jego instalacji i wyposażenia, prowadzić symulację zapotrzebowania na ciepło, chłód i energię elektryczną, które muszą być dostarczone do budynku w celu zachowania wymaganych warunków komfortu jego użytkownika. Dodatkowo analiza zużycia energii pierwotnej pozwala na określenie sprawności wykorzystania energii w budynku, co stanowić może podstawę do wyciągnięcia wniosków dotyczących możliwości zmian cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych budynku wpływających na obniżenie zużycia energii. Najważniejsze cechy symulacji prowadzonych przy pomocy programu EnergyPlus obejmują [2], [3]:

– równoczesną analizę i obliczenia parametrów wszystkich powiązanych elementów budynku wpływających na zużycie energii, m.in.: konstrukcja, instalacje, oświetlenie, zyski ciepła itd.,

– definiowalny (min. 15 min.) krok czasowy w którym analizowane są interakcje pomiędzy strefami cieplnymi i środowiskiem oraz strefami cieplnymi i instalacjami HVAC,

– dane wejściowe w formacie ASCII, zawierające warunki pogo-

dowe z krokiem czasowym 15 min.,

– bilans ciepła oparty na analizie promieniowania i konwekcji zarówno na powierzchni zewnętrznej, jak i wewnętrznej (np. obudowy budynku),

– uwzględnienie przewodzenia ciepła przez elementy budynku (ściany, dachy, podłogi itd.),

– rozbudowane modelowanie przenikania ciepła do gruntu, oparte na metodzie elementów skończonych,

– analizę komfortu cieplnego uwzględniającą temperaturę, wilgotność itd.,

– zaawansowane modele i analizy stolarki okiennej i drzwiowej uwzględniające m.in. pochłanianie promieniowania słonecznego przez szyby, przeszklenia elektrochromatyczne, sterowane rolety okienne i inne,

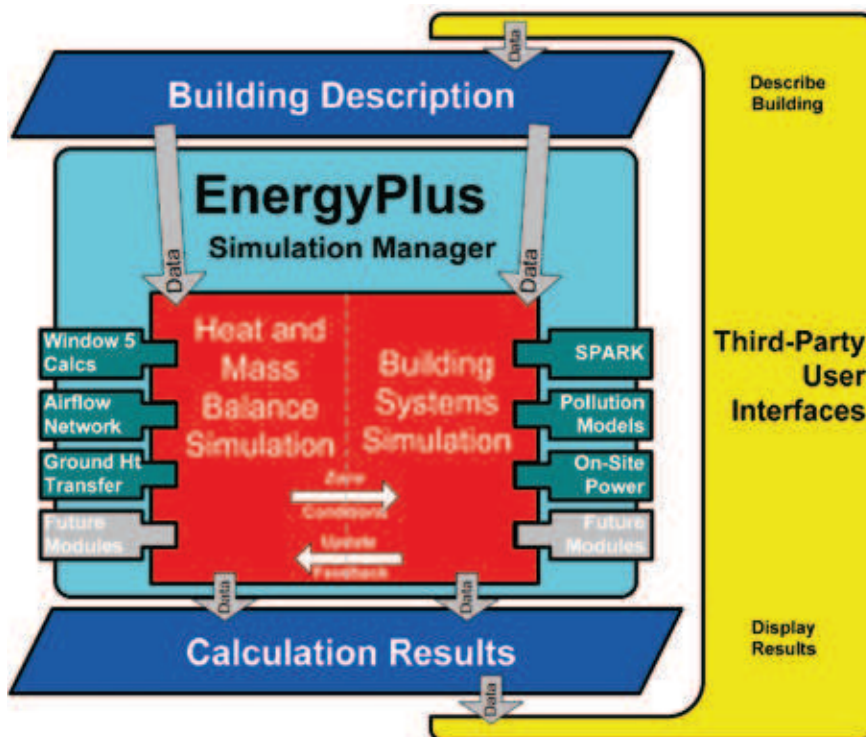
– uwzględnienie modelowania i kontroli oświetlenia dziennego,

– uwzględnienie instalacji HVAC jako elementów typowych z możliwością dowolnej konfiguracji ich cech,

– analizę i predykcję emisji zanieczyszczeń CO₂, SO_x, NO_x i CO, pyłu produkowanych zarówno w lokalnym, jak i zdalnym źródle ciepła.

Istotną cechą oprogramowania EnergyPlus jest możliwość korzystania z aplikacji zewnętrznych symulujących systemy lub zjawiska, które nie mogą być analizowane bezpośrednio w programie. Daje to możliwość łatwej i elastycznej rozbudowy funkcjonalności aplikacji. Dodatkowo, przyszłe wersje EnergyPlus, poza analizą systemów HVAC, będą uwzględniać również inne instalacje funkcjonujące w budynkach, np. instalacje zimnej wody.

Należy pamiętać o tym, iż EnergyPlus jest oprogramowaniem, które nie posiada graficznego interfejsu użytkownika. Aplikacja stanowi jedynie silnik (engine) zawierający kompletne procedury obliczeniowe (symulacyjne) oraz zdefiniowane wejście i wyjście



Rys. 1. Struktura modułów programu EnergyPlus wg [3]

jako proste pliki tekstowe ASCII. Takie podejście pozwala na tworzenie GUI (graficzny interfejs użytkownika) przez firmy zewnętrzne, co pozwala projektantom na skoncentrowanie się na jego intuicyjności i funkcjonalności, odciążając ich jednocześnie od programowania możliwości obliczeniowych programu (tym zajmują się programiści EnergyPlus). Dodatkowo zdefiniowane jako zwykłe pliki tekstowe dane wejściowe i wyjściowe pozwalają na łatwą wymianę danych pomiędzy engine i GUI, co zapewnia stabilność całego pakietu i poprawia niezawodność oprogramowania, pozwalając na analizę prawidłowości danych wejściowych i wyjściowych na każdym etapie pracy systemu.

Jedną z najbardziej korzystnych zmian aplikacji EnergyPlus w stosunku do BLAST i DOE-2 jest zorientowany obiektowo kod aplikacji i jego podział na moduły funkcjonalne, co znacząco ułatwia dodawanie nowych funkcji oraz wymianę danych wejściowych i wyników obliczeń z innymi aplikacjami, czy ich modułami.

Modularność aplikacji oraz konstrukcja kodu źródłowego sprawiają, że moduły są wyraźnie oddzielone i nie kolidują ze sobą sprawiają, że możliwe jest ich oddzielne rozwijanie przez osobne grupy specjalizowanych programistów współpracujących z naukowcami i inżynierami specjalizującymi się w danej dziedzinie. Dodatkowo cecha ta ma kluczowe znaczenie w kontekście udostępniania i rozpowszechniania kodu źródłowego w celu zwiększania puli potencjalnych deweloperów oraz zachęcania firm zewnętrznych do tworzenia programów stanowiących graficzny interfejs użytkownika, lub zwiększających funkcjonalność oprogramowania EnergyPlus. Modułową strukturę oprogramowania przedstawiono na rysunku 1.

5. DesignBuilder

Zaawansowane możliwości obliczeniowe oprogramowania EnergyPlus oraz jego popularność wywołały zainteresowanie tworzeniem aplikacji stanowiących graficzny interfejs użytkownika ułatwiający wprowadzanie danych

oraz wyświetlanie wyników symulacji zarówno w postaci tekstowej, jak również graficznej (wykresy, wizualizacje przepływu ciepła itd.). Aktualnie rozwijanych jest wiele aplikacji tego typu, natomiast najbardziej popularne i posiadające najwięcej możliwości są programy: CYPE-Building Services, Demand Response Quick Assessment Tool, DesignBuilder, Easy EnergyPlus, EFEN, Hevacomp, HLCP oraz MC4 Suite.

Ze względu na swoje możliwości związane z generowaniem trójwymiarowych modeli budynków, a także zaimplementowanymi modułami CFD do realizacji modeli symulacyjnych, najlepiej nadaje się aplikacja DesignBuilder. Oprogramowanie to dedykowane jest do tworzenia modeli budynków w przestrzeni 3D, przy wykorzystaniu bogatej bazy danych predefiniowanych materiałów budowlanych, konstrukcji przegród oraz instalacji, co w powiązaniu z dziedzinieniem tych cech przez kolejne elementy definiujące poziomy szczegółowości opisu budynku, pozwalają na szybkie i precyzyjne tworzenie modelu budynku.

DesignBuilder posiada łatwy w obsłudze OpenGL, który umożliwia budowanie modeli przez pozycjonowanie realistycznych elementów w przestrzeni 3D. Zapewnia wizualną zgodność modelowanego obiektu z rzeczywistością, nie narzucając żadnych ograniczeń dotyczących kształtów elementów budynku, przeszkleń czy przegród. W celu ułatwienia przygotowania symulacji, w oprogramowaniu udostępniono szablony konstrukcji budowlanych, sposobów wykorzystaniu budynku (np. aktywności mieszkańców), instalacji i układów HVAC oraz systemów oświetleniowych. Szablony te pozwalają na bardzo szybkie stworzenie podstawowego modelu budynku, wstępne symulowanie jego cech energetycznych i w miarę potrzeb precyzowanie poszczególnych jego elementów prowadzące

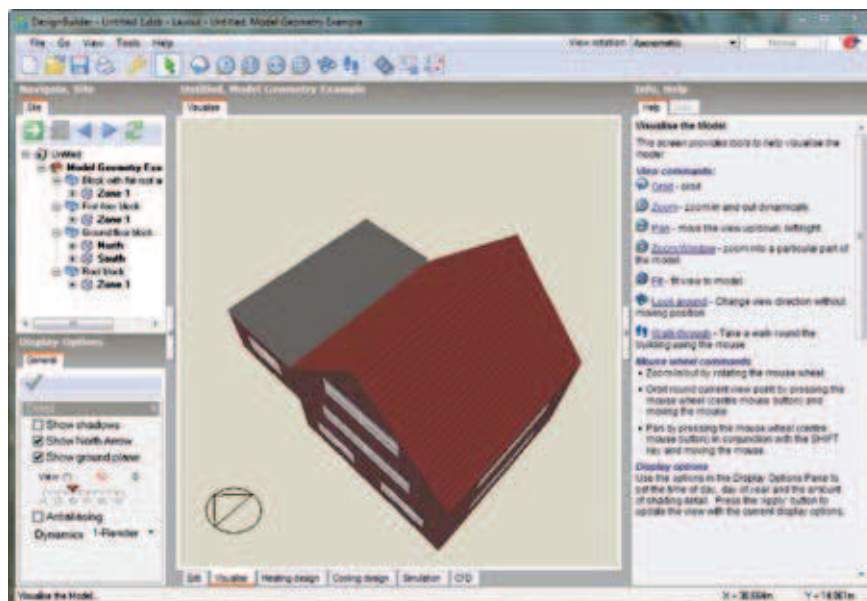
do uzyskania wyników symulacji zgodnych z rzeczywistością, np. danymi pomiarowymi (kalibrację modelu symulacyjnego). Dodatkowym atrybutem oprogramowania jest przejrzysty interfejs użytkownika (rys. 2).

6. Podsumowanie

Zastosowanie techniki komputerowej umożliwia modelowanie i symulację energetyczną dowolnych budynków przy uwzględnieniu wszystkich parametrów wpływających na zużycie energii, takich jak konstrukcja, użyte technologie docieplenia, charakterystyka wykorzystania (np. aktywność mieszkańców, nasłonecznienie, wewnętrzne zyski ciepła, praca i sprawności instalacji grzewczej, wentylacyjne i przygotowania ciepłej wody i wiele innych).

Wymaga jednak zastosowania wystarczająco wydajnych komputerów oraz odpowiedniego oprogramowania symulacyjnego. W zależności od stopnia złożoności symulowanego systemu, może ono być bardziej lub mniej skomplikowane. Najczęściej oprogramowanie to jest dedykowane do symulowania konkretnych typów systemów rzeczywistych, ale dostępne są również bardziej uniwersalne aplikacje przeznaczone do symulacji zagadnień lub procesów z określonej dziedziny wiedzy. Bardzo dobrą, szeroko wykorzystywaną aplikacją jest EnergyPlus w połączeniu z DesignBuilder stanowiącym graficzny interfejs użytkownika wyposażony w moduły CFD.

Programy symulacyjne są narzędziami efektywnie wspomagającymi praktykę inżynierską w zakresie projektowania i eksploatacji budynków zarówno mieszkalnych, jak również użyteczności publicznej czy biurowych. Dynamiczny charakter modeli pozwala uwzględniać nieustalone warunki ich pracy, wynikające m.in. ze zmienności poboru ciepła przez odbiorców. Dobry program symulacyjny zwykle pozwala definiować praktycznie



Rys. 2. Graficzny interfejs użytkownika programu DesignBuilder

dowolne elementy obiektu przez wrysowanie ich w trzech wymiarach i precyzyjne zdefiniowanie cech konstrukcyjnych i instalacyjnych. Za pomocą programu symulacyjnego można szybko i tanio ocenić wiele potencjalnych rozwiązań technologicznych i wyselekcjonować najbardziej obiecujące z technologicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Praca z programem symulacyjnym rozszerza bazę doświadczeń inżyniera i zwiększa jego możliwości podejmowania prawidłowych decyzji.

LITERATURA

- [1] Bartkiewicz P., Symulacje energetyczne w praktyce (cz. 1), Energia i Budynek 2, Warszawa 2007
- [2] Crawley D. B., Lawrie L. K., Winkelmann F. C. and others, EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, Energy and Buildings 33, p. 319–331, 2001
- [3] EnergyPlus, Getting Started with EnergyPlus. Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus, US Department of Energy, 2010
- [4] Findensein W., Szymanowski J., Wierzbicki A., Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN, Warszawa 1980
- [5] Fumo N., Mago P., Luck R., Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models, Energy and Buildings 42 p. 2331–2337, 2010
- [6] Grabarczyk S., Fizyka budowli. Komputerowe wspomaganie projektowania budownictwa energooszczędnego, Oficyna

Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005

- [7] Gutenbaum J., Modelowanie matematyczne systemów, Omnitech Press, Warszawa 1992
- [8] Krupa K., Modelowanie symulacja i prognozowanie, WNT, Warszawa 2008
- [9] Malinowski P., Modelowanie hydrotermiczne i optymalizacja systemów zaopatrzenia w ciepło, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2009
- [10] Nelles O., Nonlinear system identification: from classical approaches to neural network and fuzzy models, Springer-Verlag, 2001
- [11] Neto A. H., Fiorelli F. A., Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption, Energy and Buildings 40 p. 2169–2176, 2008
- [12] Stark R., Nicholls R., Matematyczne podstawy projektowania inżynierskiego, PWN, Warszawa 1979
- [13] Trcka M., Hensen J. L. M., Overview of HVAC system simulation, Automation in Construction 19, p. 93–99, 2010
- [14] U.S. Department of Energy, Building Energy Software Tools Directory, 2011
- [15] Yezioro A., Dong B., Leite F., An applied artificial intelligence approach towards assessing building performance simulation tools, Energy and Buildings 40 p. 612–620, 2008
- [16] Zeigler B., Teoria modelowania i symulacji, PWN, Warszawa 1984
- [17] Ziembicki P., Założenia techniczne i struktura elektronicznej bazy danych budynków badawczych, Raport R1.2, Zadanie badawcze nr 6 pt. „Analiza wymagań technicznych i eksploatacyjnych dla budynków przy zasilaniu ze scentralizowanych źródeł ciepła” (SP/B/6/90966/10), NCBiR 2011