

Algorytmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi

Marek Długosz, Paweł Piątek, Jerzy Baranowski, Paweł Skruch

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: Lokal mieszkalny jest bardzo złożonym obiektem do sterowania. Wzajemnie wykluczające się wskaźniki jakości np. komfort użytkowników i poziom zużycia energii powoduje, że niezwykle trudno znaleźć odpowiednie kompromisowe rozwiązanie. Właściwości fizyczne obiektu sterowania (np. rozkład temperatury w pomieszczeniach), a także występowanie pewnych niedeterministycznych zdarzeń (np. temperatura zewnętrzna, przebywanie w lokalu pewnej grupy osób) powodują, że do sterowania należy użyć kilku algorytmów, które mogą ze sobą współpracować (np. wymiana danych). Z jednej strony układy sterowania, np. temperaturą w pomieszczeniach, powinny zapewnić odpowiedni komfort osób w nim przebywających, z drugiej strony dąży się do tego, aby minimalizować koszty takiego sterowania. Optymalizując koszt energii grzewczej, należy uwzględnić fakt, czy w lokalu przebywają jakieś osoby albo czy też np. któreś z okien jest otwarte. Można określić także szereg innych zadań sterowania które podnoszą bezpieczeństwo i komfort mieszkańców, np. alarmy, symulacja obecności domowników, wykrywanie zalania lokalu lub pożaru.

W ramach niniejszej pracy przedstawione są zagadnienia badane w ramach projektu „Algorytmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi”. W artykule omawiane są wstępne zagadnienia związane z modelowaniem, problematykę sieci bezprzewodowych w automatyce budynkowej oraz zagadnienia testowania systemów. Pracę kończy podsumowanie i literatura.

Słowa kluczowe: automatyka, sterowanie, inteligentny budynek, optymalizacja, sieci bezprzewodowe

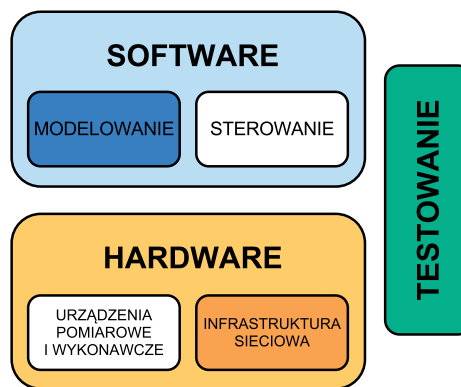
1. Wprowadzenie

Termin „inteligentne budynki” znany jest w nauce, technice, a nawet w powszechnym użyciu od wielu lat. Zagadnienia sterowania budynkami rozpatrywane jednak były zwykle w kontekście budynków biurowych, zakładów przemysłowych itp. Dopiero od niedawna, ze względu na spadające koszty urządzeń interesującym obszarem stało się sterowanie budynkami o charakterze mieszkalnym, jak domy jednorodzinne, bloki mieszkalne, czy nawet pojedyncze lokale.

Zagadnienie to jest tematem projektu „Algorytmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi” nr N N514 644440, realizowanego z funduszy Narodowego Centrum Nauki.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie i omówienie pewnych zagadnień będących obszarami zainteresowania projektu. Obszary te obrazowo zaznaczono na rys. 1. Podstawowymi trzema obszarami są warstwa programowa lub też wiedza (oznaczona jako SOFTWARE), warstwa sprzę-

towa (HARDWARE) oraz integrujące je zagadnienia testowania i syntezy. Do warstwy SOFTWARE zaliczamy opis obiektu sterowania w formie modeli różnego rodzaju, syntezę algorytmów i struktur sterowania w oparciu o różne metodyki, co między innymi obejmuje estymację stanu, metody obróbki danych, symulację w czasie rzeczywistym. W warstwie HARDWARE w ramach projektu rozpatrywane są zagadnienia infrastruktury sieciowych potrzebnych do sterowania budynkami, przy czym podstawą są tu sieci bezprzewodowe, oraz urządzenia pomiarowe i wykonawcze umożliwiające na sterowanie istotnymi z punktu widzenia zarządzania budynkiem mieszkalnym wielkościami. Trzeci obszar czyli TESTOWANIE opiera się na nowatorskich badaniach w zakresie analizy porównawczej algorytmów oraz realizacji i sposobów projektowania i implementacji wykonywanych modeli dynamicznych.



Rys. 1. Podział obszarów badawczych
Fig. 1. Division of research areas

W niniejszej pracy przedstawimy skrótowo pewne interesujące zagadnienia, w podobszarach zaznaczonych kolorem na rys. 1. Na początek zasygnalizowane zostaną problemy i zagadnienia związane z modelami matematycznymi budynków, w tym podejście obwodowe, funkcjonalne a także pewne elementy modelowania procesów złożonych. Następnie przedstawione zostaną rozważania dotyczące stosowanych rozwiązań sieciowych przy czym szczególną uwagę poświęcono standardom ZigBee i Z-wave. W końcowej części omawiane są zagadnienia testowania i syntezy zwłaszcza w kontekście typowych problemów implementacji programowych i sprzętowych.

2. Modele matematyczne budynków

Poszukując optymalnych i efektywnych metod sterowania dla danego systemu dynamicznego, musimy znać jego model matematyczny. Model taki daje możliwość poznania właściwości rzeczywistego systemu dynamicznego, dzięki czemu można w efektywny sposób wyznaczać optymalne sterowania. W zależności od tego, jakie zjawiska występują w systemie dynamicznym, modele mogą mieć różną postać, np. liniowych i nieliniowych równań różniczkowych, modeli stochastycznych, modeli logicznych itp. Model typowego Systemu Automatyki Domowej składa się z dwóch głównych części:

- modelu pewnych wielkości fizycznych mających wpływ na komfort użytkownika budynku takich jak np. temperatura wewnątrz, wilgotność;
- modelu funkcjonalnego pewnych zjawisk występujących w budynku np. włączanie/wyłączanie ogrzewania lub oświetlenia o określonych porach.

W pierwszym przypadku do modelowania (np. temperatury w budynku) wykorzystuje się równania różniczkowe. Należy tutaj podkreślić, że ze względu na złożony charakter procesów fizycznych oraz wpływ dużej liczby czynników modele zmian temperatury czy wilgotności w budynku są jedynie modelami przybliżonymi. W drugim przypadku do modelowania pewnych zjawisk logicznych wykorzystuje się tzw. modele regułowe (np. „jeśli załączono alarm, wyłącz układ automatycznej stabilizacji temperatury”).

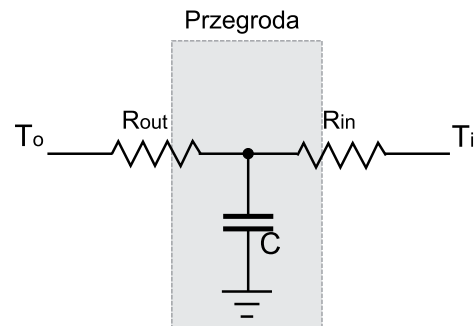
Dla efektywnego sterowania budynkiem model matematyczny oraz model funkcjonalny muszą ze sobą współpracować. Współpraca taka ma charakter dwustronny, tj. modele nawzajem mogą wymieniać między sobą dane, np. załączenie alarmu powinno wyłączyć stabilizację temperatury w budynku, podczas gdy brak reakcji na sterowanie w postaci zmiany temperatury wewnątrz pomieszczenia może świadczyć np. o awarii systemu c.o. albo czujnika pomiarowego.

Dodatkowym zagadnieniem będącym obszarem badań autorów jest próba opisu pewnych złożonych, trudnych do klasycznego modelowania zjawisk. W tym celu wykorzystywać można np. modele niecałkowitego rzędu. Zastosowanie takich modeli stanowi zagadnienie otwarte w koncepcji sterowania budynkami. Szczególnie atrakcyjne wydaje się stosowanie takich modeli w warstwie nadrzędnej oraz na etapie planowania. Dodatkowo uzupełnianie klasycznych modeli o modele zjawisk złożonych umożliwia poprawę zdolności diagnostycznych systemu.

2.1. Model cieplny budynku

Prezentowane w pracy modele są modelami uproszczonymi. W pracach naukowych na temat modelowania budynków można wyróżnić trzy różne metodyki [11]: metoda odpowiedzi temperaturowej [8], metoda różnic skończonych [6] i metoda skupionej pojemności cieplnej [7]. Podstawowe założenie przyjęte podczas ich konstrukcji jest takie, że nie modelujemy przestrzennego rozkładu temperatury w poszczególnych elementach pomieszczenia i samym pomieszczeniu. Dodatkowo przyjmujemy, że współczynnik przewodności cieplnej wewnątrz ciała jest bardzo duży lub współczynnik przyjmowania ciepła na jego powierzchni jest bardzo mały. Przy takich założeniach opis zjawiska zmian

temperatury znacząco się upraszcza i prowadzi do tzw. metody skupionej pojemności cieplnej (ang. *the lumped capacitance method*) [13, 19]. W modelach takich parametry fizyczne elementów budynku reprezentowana są przez stałe których nie zależą od innych parametrów, np. zmiennych przestrzennych, czasu. Modelowana jest średnia wartość temperatury w wybranym elemencie budynku lub samym pomieszczeniu. Przepływ ciepła z jednej przestrzeni do



Rys. 2. Jednowęzłowy model przegrody RC
Fig. 2. Single node RC wall model

drugiej oddzielonej przegrodą może być modelowany przy pomocy równoważnego układu elektrycznego RC (rys. 2). Układ taki składa się tylko z dwóch rodzajów elementów rezystorów i kondensatorów. Każdy element konstrukcyjny budynku jest reprezentowany w takim układzie elektrycznym poprzez „skupioną” rezystancję (odpowiada oporowi cieplnemu) i pojemności (odpowiada pojemności cieplnej). Napięcia w odpowiednich punktach takiego obwodu elektrycznego są interpretowane jako temperatury, natomiast prądy są interpretowane jako strumienie ciepła. Zastosowanie metody skupionej pojemności cieplnej do modelowania temperatury budynku daje w efekcie model w postaci liniowych równań różniczkowych w następującej postaci:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{Z}\mathbf{z}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

gdzie:

A – macierz stanu,

B – macierz sterowania,

Z – macierz zakłóceń,

C – macierz wyjścia,

x(t) – wektor stanu,

z(t) – wektor zakłóceń,

u(t) – wektor sterowania,

y(t) – wektor wyjścia.

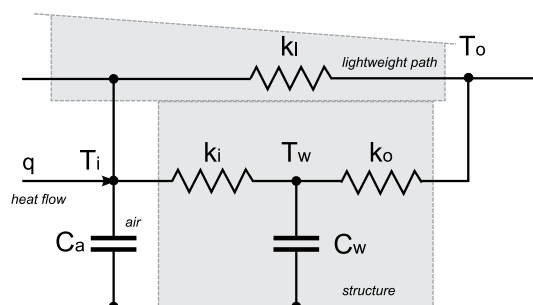
Poniżej zamieszczono przykładowy model otrzymany metodą skupionej pojemności cieplnej. Równania (3) i (4) przedstawiają przykładowy model zmian temperatury szkoły Tidcombe Lane Shool w Tiverton [7].

$$C_a \dot{T}_i = q - k_1(T_i - T_o) - k_i(T_i - T_w) \quad (3)$$

$$C_w \dot{T}_w = -k_o(T_w - T_o) - k_i(T_w - T_i) \quad (4)$$

Równanie (3) modeluje zmiany temperatury powietrza wewnątrz budynku. Równanie (4) modeluje temperaturę struktury budynku. Model dany równaniami (3) i (4) jest modelem bardzo uproszczonym. Modeluje on zmiany tylko

dwóch zmiennych. Zakłada się w nim dodatkowo, że cały budynek skonstruowany jest z materiałów o takich samych parametrach fizycznych (ściany, sufit, podłoga). Inercja cieplna powietrza wewnątrz budynku jest modelowana stałą C_a , która jest określona jako pojemność cieplna powietrza wewnątrz budynku. Współczynniki przewodzenia (przenikania) ciepła k_o i k_i stanowią sumę wszystkich składowych współczynników przewodzenia (przenikania) ciepła elementów konstrukcyjnych wchodzących w skład budynku. Modele dynamiki zmian temperatury wewnętrznej budynku



Rys. 3. Równoważny model elektryczny RC
Fig. 3. Equivalent electric RC model

otrzymane przy wykorzystaniu metody skupionej pojemności cieplnej posiadają wiele zalet, z który warto wymienić następujące:

- postać matematyczna takiego modelu to układ równań różniczkowych liniowych,
- łatwość budowania modeli matematycznych złożonych budynków np. całych mieszkań, domów jednorodzinnych czy nawet całych budynków mieszkalnych,
- możliwość upraszczania lub redukowania do mniejszych wymiarów modeli złożonych z dużej liczby równań,
- część parametrów fizycznych można wyznaczyć na podstawie danych konstrukcyjnych materiałów modelowanego budynku (np. ciepła właściwe lub opory termiczne elementów konstrukcyjnych),
- model może być interpretowany jako układ drabinkowy RC,
- w modelu takim można uwzględnić szereg zjawisk zewnętrznych, które mają ostatecznie wpływ na temperaturę wewnątrz budynku, np. nasłonecznienie, temperatura zewnętrzna, wiatr.

Oczywiście modele takie nie są pozbawione wad. Największą z nich wydaje się konieczność estymowania temperatur wewnątrz struktur budynku, takich jak np. ściany, podłogi, lub jeżeli zastosowano redukcję liczby równań, także temperatur pewnych zastępczych elementów konstrukcyjnych. Utrudnia to weryfikację poprawności działania modelu, identyfikację jego parametrów czy też zastosowanie regulatorów od stanu układu.

2.2. Model funkcjonalny budynku

Istotną częścią kompleksowego modelu budynku jest model funkcjonalny budynku. Tutaj pod tym pojęciem rozumie się grupę modeli, których zasadę działania opisuje się przy pomocy pewnych reguł lub algorytmów, np. jeśli czujnik ruchu nie wykrywa żadnego ruchu w pomieszczeniu przez

zadany okres czasu, to należy wyłączyć światło. Liczba takich modeli może być bardzo duża i mogą to być proste modele regulowe lub też bardzo zaawansowane algorytmy postępowania, np. załączenie systemu alarmowego w domu jednorodzinym powinno być poprzedzone szeregiem czynności sprawdzających (np. zamknięcia wszystkich okien), jak też aktywnych działań (np. wyłączeniem kuchenki elektrycznej, wyłączeniem stabilizacji temperatury, włączeniem systemu symulowania obecności użytkowników). Do zakresu modeli funkcjonalnych można zaliczyć następujące przykładowe systemy wspomagające komfort, użyteczność budynków i podnoszących ich bezpieczeństwo: systemy alarmowe, przeciwpożarowe, symulacja obecności użytkowników, tak zwany „panic button”, jeden wyłącznik wszystkich urządzeń elektrycznych, i wiele innych.

Modele funkcjonalne budynku zapisane są w formie reguł lub algorytmów działania lecz ich konfiguracja lub dostrojenie może być czasochłonne i kłopotliwe. Często jednym z wymagań tej grupy modeli jest, by niejako „nauczyły” się one zwyczajów użytkowników danego budynku, mieszkania, domu. Algorytm uczenia powinien w krótkim czasie odnaleźć pewne rutynowe schematy postępowania użytkowników i na podstawie tej wiedzy odpowiednio skonfigurować pozostałe algorytmy sterowania. Na przykład od poniedziałku do piątku domownicy o określonej godzinie opuszczają budynek i wracają do niego o pewnej porze popołudniowej. Algorytm uczenia powinien wychwycić tę regularność i odpowiednio sterować układem stabilizacji temperatury, tak aby w okresie nieobecności domowników niepotrzebnie nie ogrzewać budynku, ale przed samym powrotem podnieść temperaturę do wartości zadanej.

3. Modelowanie zjawisk złożonych w budynkach

Przy analizie budynków mieszkalnych mamy do czynienia z szeregiem problemów niespotykanych w zagadnieniach klasycznej automatyki budynkowej. Ze względu na inne zasady funkcjonowania, inne są też wymagania i oczekiwania mieszkańców. W przypadku takich budynków mamy do czynienia między innymi z niepomijalną niejednorodnością struktury budowli, z wynikającymi ze skali, silnymi efektami stosowania różnych materiałów budowlanych, lub (w przypadku np. bloków) z bardzo zróżnicowanym zachowaniem się poszczególnych mieszkań. Zagadnienie opisu takich zjawisk stanowi zagadnienie otwarte i jego wykorzystanie w analizie i sterowaniu systemów automatyki budynków mieszkalnych może prowadzić do unikalnych wyników. Istnieją silne przesłanki wskazujące na to, że aparat równań różniczkowych niecałkowitego rzędu może być właściwym narzędziem do modelowania zjawisk złożonych. Jednym ze szczególnie interesujących zagadnień jest teoria procesów termoelelastycznych stosująca ułamek równanie ciepłoprzewodnictwa [23, 24]:

$$\frac{\partial^\alpha \mathbf{c}}{\partial t^\alpha} = a \Delta \mathbf{c} \quad (5)$$

gdzie \mathbf{c} jest zmienną, zaś Δ oznacza operator Laplace'a (przy równaniu w jednym wymiarze jest to druga pochodna całkowitego rzędu). Badania wskazują, że równania tego typu są dobrym modelem zjawisk fizycznych zachodzących między innymi w strukturach amorficznych, szklistych

lub porowatych. Inne podejście do zagadnień modelowania procesów złożonych można znaleźć w rozwiązaniach korzystających z tzw. mechaniki ułamkowej (ang. *fractional mechanics*) [3, 17]. Podejście to polega na stosowaniu złożonych tzw. jednostronnych operatorów Caputo lewostronnego D_{0+}^{α} i prawostronnego D_{b-}^{α} definiowanych jako:

$$D_{0+}^{\alpha} T(x) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^x \frac{T^{(n)}(\tau)}{(x-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad \text{dla } x > 0$$

$$D_{b-}^{\alpha} T(x) = \frac{(-1)^n}{\Gamma(n-\alpha)} \int_x^b \frac{T^{(n)}(\tau)}{(\tau-x)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad \text{dla } x < b$$
(6)

przy czym $n = \lceil \alpha \rceil$. Operatory te wykorzystywane są np. w kontekście analizy następujących równań różniczkowych ułamkowego rzędu:

$$D_{b-}^{\alpha} D_{0+}^{\alpha} T(x) - \lambda T(x) = 0$$

$$D_{0+}^{\alpha} D_{b-}^{\alpha} T(x) - \lambda T(x) = 0$$
(7)

dla $x \in [0, b]$ oraz z warunkami brzegowymi $T(0) = T_0$ oraz $T(b) = T_b$. Podejście to wydaje się szczególnie obiecujące w opisie procesów granularnych, jak np. przepływy ciepła w budynkach mieszkalnych o wielu lokalach. Teoria układów ułamkowego rzędu jest obecnie coraz lepiej ugruntowana i dostępne są bardzo dobre monografie na ten temat [15, 20]. Zagadnienia te są szczególnie interesujące, ponieważ układy niecałkowitego rzędu nie są systemami dynamicznymi w klasycznym sensie. Nie mają one bowiem właściwości półgrupowej (ewolucji). Jest to o tyle ważne, że wprowadza pewne istotne komplikacje w rozwiązywaniu takich równań w czasie rzeczywistym.

4. Sieci a automatyka budynku

Mówiąc o inteligentnych budynkach, mamy zwykle na myśli większe lub mniejsze biurowce lub inne budynki o przeznaczeniu „biznesowym”. W ostatnich latach trend ten przybrał na sile ze względu na przykładanie coraz większej uwagi przez inwestorów do zużycia energii w tego typu budynkach. Systemy automatyki zarządzające ogrzewaniem, klimatyzacją, wentylacją, oświetleniem oraz innymi systemami pozwalają na duże oszczędności, a jednocześnie mogą poprawić komfort użytkownika. W przypadku takich budynków systemy automatyki nazywamy Systemami Automatyki Budynkowej (ang. *Building Automation Systems*) [14].

Korzyści płynące z zastosowania systemów BAS oraz zmniejszające się koszty urządzeń sprawiają, że rozwiązania tego typu są od kilkunastu lat coraz chętniej stosowane w budynkach mieszkalnych, domach, czy nawet w pojedynczych mieszkaniach. W tym przypadku możemy mówić o Systemie Automatyki Domowej (ang. *Home Automation System*) [14]. Początkowo tego typu systemy rozwijano na dwa główne sposoby:

- przez adaptację systemów typu BAS,
- przez tworzenie nowych standardów komunikacji.

Oba te podejścia mają swoje wady i zalety. Zadania i cele stawiane przed systemami typu BAS i HAS są inne. Systemy automatyki budynkowej zwykle projektuje się jako warstwowe systemy automatyki. Można w nich wyróżnić trzy najważniejsze warstwy [14]:

- warstwę polową (ang. *Field Layer*) – zawierająca urządzenia sterowania bezpośredniego, np. zarządzalne przełączniki światła, włączniki, zawory ogrzewania, termometry,
- warstwę automatyzacji (ang. *Automation Layer*) – zawierająca i łącząca sterowniki, regulatory i serwery sterujące pracą urządzeń sterowania bezpośredniego,
- warstwę zarządzania (ang. *Management Layer*) – zawierającą systemy wizualizacji, zarządzania oraz gromadzenia danych.

Systemy automatyki budynkowej są zwykle dużymi i rozległymi instalacjami. Ich funkcjonowanie nierozłącznie powiązane jest z wykorzystaniem sieci komunikacyjnych. Hierarchiczna budowa i sposób funkcjonowania systemu powoduje, że wymagania do sieci są różne w poszczególnych warstwach, np. warstwa polowa wymaga szybkiej transmisji małych porcji danych z zachowaniem rygorów czasu rzeczywistego. Im wyższa warstwa, tym większe wymagania co do przepustowości sieci i mniejsze co do czasu dostarczenia danych. Z tego powodu w instalacjach BAS często stosuje się różne typy sieci do obsługi poszczególnych warstw systemu. Nie jest to jednak sztywna reguła. W wielu instalacjach wykorzystuje się sieci, które zostały stworzone z myślą o systemach automatyki budynkowej, takie jak KNX, BACNet czy LonWorks. Standardy te zostały stworzone z myślą o systemach typu BAS, jednak ze względu na złożoność tych systemów muszą łączyć w sobie wymagania obsługi wszystkich warstw lub być zorientowane na obsługę jednej z warstw systemu, np. KNX i LonWorks na warstwę polową, a BACNet na warstwę zarządzania. Sieci komunikacyjne w systemach BAS są zwykle sieciami przewodowymi. Głównymi powodami tego są:

- większe bezpieczeństwo w stosunku do sieci bezprzewodowych,
- większa niezawodność w stosunku do sieci bezprzewodowych,
- duży obszar działania sieci,
- stosowanie odrębnych sieci w poszczególnych warstwach systemu,
- sposób tworzenia systemu BAS.

Ze względu na sposób użytkowania budynków oraz zarządzania nimi, systemy automatyki budynkowej tworzy się zwykle w całym budynku podczas budowy lub generalnego remontu, i można wtedy ułożyć niezbędne okablowanie dla sieci komunikacyjnych. Wymagania stawiane systemom automatyki domowej są nieco inne niż te dla systemów automatyki budynkowej. Instalacje HAS są przede wszystkim mniejszymi instalacjami, tzn. zawierają mniej urządzeń, których złożoność jest mniejsza, a także swoim działaniem obejmują mniejszy obszar. System HAS po prostu będzie zwykle mniej złożony niż typowy system BAS. W domach czy mieszkaniach zwykle nie ma wind czy zaawansowanych systemów przeciwpożarowych. Zastosowane w domach i mieszkaniach urządzenia mogą łączyć w sobie funkcjonalności warstwy polowej, automatyzacji oraz warstwy zarządzania. Z tego powodu w systemach HAS często nie wydziela się zwykle osobnych sieci komunikacyjnych i cały system jest połączony przy pomocy jednej lub dwóch sieci. Jak wcześniej wspomniano, do budowy systemów HAS

wykorzystuje się odpowiedni zaadaptowane sieci BAS lub systemy zbudowane specjalnie na potrzeby automatyki domowej. Podobnie jest z sieciami stosowanymi w tych instalacjach. Stosuje się m.in. standard: KNX, LonWorks, HomePlug, ZigBee, czy Z-Wave.

Wymagania co do niezawodności, bezpieczeństwa oraz zasięgu działania dla systemów „domowych” są dużo mniejsze niż dla systemów w budynkach o przeznaczeniu komercyjnym i dlatego w systemach „domowych” dużo chętniej stosowane są sieci bezprzewodowe. Ich bardzo ważną zaletą jest możliwość instalacji bez konieczności remontu lub przebudowy lokalu. Dużo łatwiejsze, niż w przypadku sieci kablowych, są wszelkiego rodzaju przebudowy i rekonfiguracje. Z drugiej strony urządzenia bezprzewodowe oferują:

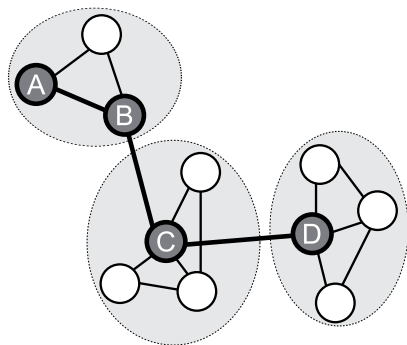
- gorszy poziom bezpieczeństwa – możliwość podsłuchu lub zakłócenia transmisji,
- gorszy poziom niezawodności – część urządzeń jest zasilana bateriami, mogą występować zakłócenia transmisji.

Do przeprowadzenia badań związanych z modelowaniem oraz syntezą sterowania w systemach automatyki domowej niezbędne jest zbudowanie odpowiednich stanowisk laboratoryjnych. Budowane są stanowiska złożone z kilku do kilkunastu urządzeń pracujących z wykorzystaniem technologii bezprzewodowych. Zdecydowano o wyborze dwóch standardów:

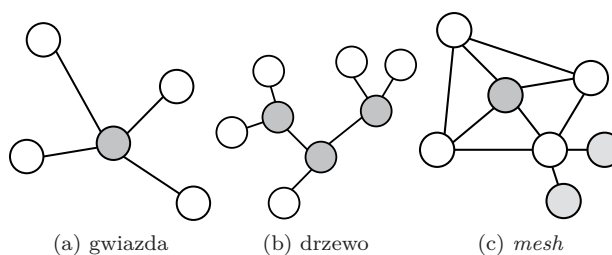
- otwartego standardu ZigBee,
- zamkniętej technologii Z-Wave.

5. Z-Wave

Z-Wave (<http://www.z-wave.com>) jest bezprzewodowym protokołem zaprojektowanym przez firmę ZenSys (rok założenia 1999) przeznaczonym tylko do urządzeń automatyki domowej. Technologia Z-Wave nie implementuje żadnego oficjalnego standardu komunikacji bezprzewodowej. Ze względu na jej popularność oraz liczbę dostępnych urządzeń de facto sama stała się standardem. Firmy produkujące urządzenia Z-Wave zrzeszone są w Z-Wave Alliance (<http://www.z-wavealliance.org>). Szybkość przesyłania danych jest mniejsza niż w przypadku ZigBee. Pierwszym trzem generacjom układów Z-Wave zarzucano także brak sprzętowego szyfrowania transmisji pomiędzy urządzeniami. W aktualnie produkowanej czwartej wersji chipów obsługujących Z-Wave wprowadzono sprzętowe szyfrowanie.



Rys. 4. Sposób komunikowania się urządzeń niemających fizycznego połączenia w sieci Z-Wave
Fig. 4. Method of communication of devices without physical connection in Z-Wave network



Rys. 5. Topologie sieciowe implementowane przez ZigBee
Fig. 5. Network topologies implemented in ZigBee

Urządzenia Z-Wave mogą pracować tylko w topologii sieci mesh. Struktura takiej sieci jest tworzona sposób automatyczny, bez ingerencji użytkownika (rys. 4). Rozpoznawane są urządzenia w niej pracujące oraz wytyczane są trasy do poszczególnych urządzeń. Każde urządzenie w sieci oprócz tego, że wykonuje komendy przesłane do niego, może przekazywać komunikaty do następnych urządzeń. Dzięki takiemu rozwiązaniu dwa urządzenia, które fizycznie nie mają ze sobą połączenia mogą bez problemu się komunikować. Na rys. 4 linią pogrubioną przedstawiono przykładową drogę komunikacji między urządzeniami A i D. Jak widać, w komunikacji biorą udział także urządzenia B i C jako przekaźniki komunikatów. Ponieważ w sieci nie istnieje żaden komputer nadzorujący istniejące trasy, w przypadku np. awarii urządzenia B komunikat do urządzenia D zostanie przesłany inną trasą.

6. ZigBee

Technologia ZigBee (<http://zigbee.org>) jest implementacją standardu IEEE 802.15.4. Pierwsza wersja 1.0 została opracowana w 2004. W przeciwieństwie do Z-Wave, technologia ZigBee nie jest przeznaczona tylko do urządzeń automatyki domowej. W bardziej ogólnym ujęciu umożliwia ona tworzenie własnych, bezpiecznych sieci bezprzewodowych, a urządzenie automatyki domowej są tylko jednym z przykładów możliwości wykorzystania tej technologii. Firmy wspierające prace nad technologią ZigBee i produkujące urządzenia są zrzeszone w ZigBee Alliance. Są to np. Ember Corporation, Texas Instruments, Philips, Freescale Semiconductors, CompXS, Atmel, GE Energy, Samsung. Urządzenie pracujące w układach automatyki domowej z wykorzystaniem technologii ZigBee zgrupowane są w dwóch profilach aplikacji: *ZigBee Home Automation Public Application Profile* oraz *Smart Energy Profile*. Pierwsza grupa zawiera takie urządzenia, jak: HVAC, zarządzanie oświetleniem, *window shades*, układy alarmowe. Druga grupa zawiera urządzenia i aplikacje do zarządzania zużyciem energii. Układy scalone produkowane są przez kilkudziesięciu niezależnych od siebie producentów, jak np. Texas Instrument, Atmel, ST.

Specyfikacja ZigBee określa trzy rodzaje topologii sieci, w jakiej mogą pracować urządzenia, są to: gwiazda, mesh i drzewo (rys. 5). Dzięki możliwości automatycznego określania drogi pakietów (routowania) zasięg sieci jest teoretycznie nieograniczony. Po wybraniu topologii sieci, z której chce się korzystać, samo tworzenie się takiej sieci i wyznaczanie tras do poszczególnych urządzeń przebiega w sposób zautomatyzowany. Transmisja danych w sieciach ZigBee

jest bardzo bezpieczna i szybka. Przesyłane dane są szyfrowane na poziomie sprzętowym. Większe bezpieczeństwo i prędkość transmisji jest konsekwencją przyjęcia założenia o wykorzystaniu technologii ZigBee w szerszej klasie urządzeń niż tylko w urządzeniach automatyki domowej.

7. ZigBee vs. Z-Wave

Z-Wave i ZigBee są technologiami umożliwiającymi budowanie sieci bezprzewodowych [9, 10, 12, 16, 29, 30]. Obydwie technologie mają wiele cech wspólnych, ale występują także pewne różnice.

W tabeli 1. zebrano i porównano podstawowe parametry technologii ZigBee i Z-Wave. Tabela pozwala na porównanie parametrów obu systemów. Dla użytkowników oraz projektantów istotne są także opisane dalej zagadnienia, jak zasięg sieci, dostępność urządzeń, koszt urządzeń czy wzajemna współpraca urządzeń.

Zasięg i maksymalna ilość urządzeń w systemie (ZigBee \oplus , Z-Wave \ominus). Oba typy sieci mogą wykorzystywać topologie typu mesh. W teorii daje to w zasadzie nieograniczony zasięg sieci. W rzeczywistych rozwiązaniach jest on jednak limitowany maksymalną ilości pracujących urządzeń. W przypadku Z-Wave występuje 32-bitowy homeID oraz 8-bitowy nodeID. W jednej „instalacji” może pracować więc max. 255 (w praktyce 232) urządzeń. W przypadku ZigBee urządzenie jest adresowane 16- lub 64-bitowym adresem MAC, co daje możliwość zbudowania większej (bardziej rozległej) sieci.

Standard (ZigBee \oplus , Z-Wave \ominus). ZigBee jest standardem otwartym, powstałym jako rozwinięcie standardu IEEE 802.15.4. Z-Wave jest zamkniętym protokołem opracowanym przez jedną firmę (Zensys). Dokumentacja jest udostępniana tylko członkom organizacji.

Dostępność urządzeń (ZigBee \ominus , Z-Wave \oplus). W obecnej chwili na rynku lepiej dostępne są urządzenia Z-Wave. Na rynku działa więcej producentów oraz dostępny jest większy wybór urządzeń.

Ceny urządzeń (ZigBee \ominus , Z-Wave \oplus). Obecnie urządzenia Z-Wave są tańsze od urządzeń ZigBee. Zapewne duży wpływ na taka sytuację ma większa konkurencja w przypadku systemu Z-Wave.

Współpraca urządzeń różnych firm (ZigBee \ominus , Z-Wave \oplus). Od czasu zamknięcia protokołu wszystkie urządzenia Z-Wave są zgodne ze specyfikacją i dzięki temu można bez większych problemów budować sieci automatyki domowej wykorzystujące urządzenia różnych producentów. Nieco inaczej jest w przypadku ZigBee. Niektórzy producenci implementują w urządzeniach zmodyfikowany protokół, przez co urządzenia nie są zgodne ze specyfikacją i nie współpracują z urządzeniami innych producentów.

Podsumowując, ZigBee jest standardem technicznie lepszym. Daje większe możliwości rozbudowy, lepsze bezpieczeństwo, wsparcie dużych firm produkujących półprzewodniki. Powstał do zastosowania nie tylko w instalacjach HAS, czy BAS, ale również w systemach automatyki, energetyki, telekomunikacji, czy też medycyny. Jego potencjalne możliwości rozwoju są bardzo duże. Z-Wave oferuje za to więcej urządzeń pochodzących od różnych producentów. Ceny urządzeń są niższe, urządzenia lepiej dostępne. Nie występują problemy ze współpracą urządzeń pochodzących

od różnych producentów. Paradoksalnie, mimo braku otwartości standardu Z-Wave istnieje znacznie większa liczba oprogramowania otwartego i frameworków niż w przypadku ZigBee. Z drugiej strony Z-Wave został stworzony jako dedykowany dla systemów automatyki domowej. Z tego powodu w jego rozwój będzie zaangażowanych mniej firm niż w konkurencyjny ZigBee. Dla mniejszych instalacji Z-Wave wydaje się lepszym rozwiązaniem na bieżącą chwilę czasu. W perspektywie kilku lat należy jednak uważnie obserwować rynek urządzeń ZigBee, ponieważ może się on dynamicznie rozwinąć dystansując inne rozwiązania.

8. Synteza i testowanie układów sterowania w inteligentnych budynkach

System sterowania dla inteligentnego budynku jest systemem rozproszonym. Składa się on z szeregu systemów automatyki pracujących autonomicznie i działających z reguły w czasie rzeczywistym. Systemy te współpracują i komunikują się ze sobą w ściśle określony i kontrolowany sposób za pomocą przewodowych i bezprzewodowych połączeń. Współczesny układ automatyki inteligentnego budynku jest specjalizowanym układem elektronicznym wyposażonym w oprogramowanie realizujące określoną funkcję sterowania. Tego typu systemy określa się mianem systemów wbudowanych (ang. *embedded systems*).

Podstawową cechą wyróżniającą systemy wbudowane na tle innych systemów komputerowych jest ich dedykowany charakter; głównym zadaniem takiego systemu jest realizacja sterowania dla analogowego urządzenia elektrycznego, chemicznego lub mechanicznego. Realizacja sterowania odbywa się z reguły na niestandardowej platformie sprzętowej, która jest bardzo często skonstruowana i skonfigurowana specjalnie na potrzeby danego urządzenia. Systemy wbudowane są zwykle systemami czasu rzeczywistego oraz mogą być systemami krytycznymi ze względu na bezpieczeństwo. Ze względu na obszary zastosowań system wbudowany musi być dobrze zaprojektowany, przetestowany i stabilny. Błędy w architekturze, oprogramowaniu i wykonaniu mogą być bardzo kosztowne w skutkach.

Tworzenie wbudowanego układu elektronicznego przeznaczonego dla inteligentnego budynku wymaga dokładnego przeanalizowania wymagań, opracowania odpowiedniej architektury, stworzenia oprogramowania, testowania oprogramowania i całego systemu. Każdy błąd, czy zlekceważenie pewnych wymagań we wstępnych fazach projektu może wydłużyć czas trwania projektu, może prowadzić do zwiększenia kosztów realizacji projektu, czy też nawet może prowadzić do niepowodzenia całego przedsięwzięcia. Złe decyzje projektowe pociągają za sobą często konieczność modyfikacji nie tylko oprogramowania, lecz także sprzętu. W przypadku systemów do zastosowań krytycznych i związanych z bezpieczeństwem pojawia się też problem wiarygodności, czyli odporności systemu na awarie sprzętu, niespodziewane warunki pracy, zakłócenia elektromagnetyczne, błędy implementacyjne itd.

W ostatnich latach sposób wytwarzania i testowania oprogramowania dla systemów wbudowanych ulega zmianie [27, 28, 31]. Coraz więcej modułów nie jest już kodowanych ręcznie przez programistów, lecz modelowanych

Tab. 1. Porównanie parametrów dwóch sieci bezprzewodowych ZigBee i Z-Wave**Tab. 1.** Comparison of ZigBee and Z-Wave wireless networks parameters

	ZigBee	Z-Wave
Częstotliwość pracy (MHz)	868/915/2400	868/906 2400 – w układach serii 400
Zasięg (m)	10-100	30 – w pomieszczeniach 100 – na zewnątrz
Szybkość transmisji (kb/s)	20/40/250	9,4 40 – w układach serii 200 200 – w układach serii 400
Rozmiar wiadomości (B)	127	64
Kontrola błędów	16-bit CRC, ACKs (opcjonalnie)	8-bitowa suma kontrolna, ACKs (opcjonalnie)
Typy urządzeń	Koordinator, urządzenie standardowe, urządzenie końcowe	Kontroler, urządzenie
Niezawodność	ACKs oraz kontrola duplikowanych pakietów	ACKs
Bezpieczeństwo	AES 128-bit sprzętowe	AES 128-bit – w układach serii 400
Rozmiar i rodzaj pamięci	45-128 kB (ROM) 2,7-12 kB (RAM)	32-64 kB flash 2-16 kB (SRAM)
Identyfikatory	16- i 64-bitowe MAC adresy	32-bitowy homeID, 8-bitowy nodeID Nie
Specyfikacja dostępna publicznie	Tak	

z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi. Kod źródłowy jest następnie generowany z powstałych modeli w sposób automatyczny. Modele są też wykorzystywane do reprezentacji wymagań (specyfikacji), jak również z modeli generuje się automatycznie przypadki testowe. Modele stają się zatem nieodłącznym elementem przy projektowaniu układów, są coraz intensywniej wykorzystywane przy symulacjach, ponadto nastąpił duży rozwój narzędzi wspierających automatyczną generację kodu źródłowego oraz przypadków testowych z modeli. Badania pokazują, że w zależności od roli jaką ma spełniać urządzenie, 30–70 % czasu poświęca się na czynności związane z testowaniem danego urządzenia.

Testowanie to działanie polegające na weryfikacji, czy wytworzony układ spełnia wyspecyfikowane wymagania [4, 5, 18]. Innymi słowy, testowanie układów automatyki będzie polegać na odpowiednim dobieraniu funkcji sterujących oraz warunków początkowych, tak aby zbudowany układ fizyczny był jak najbardziej „podobny” w zachowaniu do jego reprezentacji modelowej. Głównym elementem procesu testowania jest tworzenie tzw. przypadków testowych. Przypadek testowy to zbiór wejść, warunków wykonania oraz oczekiwanych wyników utworzony w celu wykonania określonej ścieżki w programie lub w modelu lub w celu zweryfikowania zgodności z określonym wymaganiem (IEEE Std 610.12-1990). Najważniejszymi elementami każdego przypadku testowego jest odpowiednia stymulacja systemu, czyli dobór funkcji sterujących oraz warunków początkowych oraz pomiar i ocena poprawności produkowanych przez system wyników. Do oceny produkowanych przez system wyników w praktyce wykorzystuje się takie urządzenia jak analizatory stanów logicznych, oscyloskopy, mierniki, emulatory sprzętowe, wbudowane programy śledzące itp. W przypadku systemów dynamicznych sprawa się trochę komplikuje, gdyż analiza poprawności funkcji wyjścia sys-

temu musi odbywać się w sposób ciągły w określonym z góry przedziale czasowym. Niewątpliwie istotnym elementem jest też budowa środowiska testowego, za pomocą którego można wykonywać przygotowane przypadki testowe.

Niewątpliwie bardzo ważnym elementem w procesie testowania jest określenie tak zwanego pokrycia strukturalnego, czyli miary wskazującej, jaki odsetek wybranych elementów jest „pokryty” (wykonany, osiągnięty) podczas wykonywania zestawu przypadków testowych. Określenie dobrych technik pomiaru pokrycia strukturalnego w przypadku układów automatyki jest zadaniem niełatwym [25, 26]. Naturalnym wyborem wydaje się pomiar pokrycia stanów systemu, czyli przestrzeni stanów. Jeżeli przestrzeń stanów zawiera skończoną liczbę elementów, to takie zadanie może być wykonalne. W większości przypadków przestrzeń stanów jest zbiorem ciągłym o nieskończonej liczbie elementów i zbudowanie przypadków testowych, które przechodzą przez wszystkie stany systemu może okazać się niemożliwe do realizacji.

9. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd zagadnień związanych z problemami sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi. Omówienie to ma charakter skrótowy i ma na celu bardziej sygnalizację pewnych problemów i kierunków badań. W pracy nie opisano problematyki sterowania, nad którą również prowadzone są badania. Pominięto zagadnienia transferu energii w układach o charakterze łańcuchowym występujących w modelowaniu budynków [1], a także praktycznych implementacji regulatorów postaci ułamkowej [2, 21], co jest szczególnie interesujące w kontekście regulatorów ułamkowego rzędu typu $PI^\lambda D^\mu$ [22]. Pominięto również zagadnienia związane z urządzeniami automatyki. Obecnie w trakcie konstrukcji jest stanowi-

sko pilotażowe automatyki domów mieszkalnych oparte na technologii Z-Wave.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N514 644440.

Bibliografia

- Baranowski J., Długosz M., Ganobis M., Mitkowski W., Obrączka A., Skruch P. (2011): *Modelowanie i sterowanie wybranych procesów energetycznych z wykorzystaniem układów łańcuchowych*, [w:] KKA 2011 : XVII Krajowa Konferencja Automatyki : Kielce–Cedzyna, 19–22.06.2011 r. : streszczenia referatów, 169–170, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- Baranowski J., Piątek P. (2011): *Zastosowanie dedykowanych architektur sprzętowych do rozwiązywania ułamkowych równań różniczkowych liniowych*, [w:] KKA 2011 : XVII Krajowa Konferencja Automatyki : Kielce–Cedzyna, 19–22.06.2011 r. : streszczenia referatów, 171–172, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- Błaszczak T., Kotela E., Hall M. R., Leszczyński J. S. (2011): *Analysis and Applications of Composed Forms of Caputo Fractional Derivatives*, Acta Mechanica et Automatica 5(2), 11–14.
- Boris B. (1990): *Software Testing Techniques*. Van Nostrand Reinhold, Boston, 2nd wydanie.
- Boris B. (1995): *Black-Box Testing: Techniques for Functional Testing of Software and Systems*. John Wiley & Sons, New York.
- Clarke J. (2001): *Energy simulation in building design*. Butterworth-Heinemann.
- Crabb J. A., Murdoch N., Penman J. M. (1987): *A simplified thermal response model*, Building Services Engineering Research and Technology 8(1), 13–19.
- G. P. Mitalas D. G. S. (1967): *Room thermal response factors*, ASHRAE Transactions 73.
- Gill K., Yang S.-H., Yao F., Lu X. (2009): *A zigbee-based home automation system*, Consumer Electronics, IEEE Transactions on 55(2), 422–430.
- Gomez C., Paradells J. (2010): *Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies*, Communications Magazine, IEEE 48(6), 92–101.
- Gouda M. M., Danaher S., Underwood C. P. (2002): *Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization*, Building and Environment 37(12), 1255–1265.
- Gratton D. A. (2007): *Developing Practical Wireless Application*. Elsevier.
- Incropera F., DeWitt D. (2007): *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley.
- Irwin J. D. (1997): *The industrial electronics handbook*. The electrical engineering handbook series, CRC Press.
- Kaczorek T. (2011): *Selected Problems of Fractional Systems Theory*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Knight M. (2006): *Wireless security - How safe is Z-wave?*, Computing Control Engineering Journal 17(6), 18–23.
- Leszczyński J. S. (2011): *An Introduction to Fractional Mechanics*. Czestochowa University of Technology, Czestochowa.
- Myers G. (1979): *The Art of Software Testing*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Narowski P. (2008): *Podstawy uproszczonej metody godzinowej obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków*, Energia i Budynek 5(15), 6–11.
- Ostalczyk P. (2008): *Zarys rachunku różniczkowo-calkowego ułamkowych rzędów. Teoria i zastosowania w automatyce*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
- Piątek P., Baranowski J. (2011): *Investigation of Fixed-Point Computation Influence on Numerical Solutions of Fractional Differential Equations*, Acta Mechanica et Automatica 5(2), 101–107.
- Podlubny I. (1999): *FRACTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS. An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations to Methods of their Solution and some of their Applications*. Academic Press.
- Povstenko Y. (2005): *Fractional heat conduction equation and associated thermal stress*, Journal of Thermal Stresses 28(1), 83–102.
- Povstenko Y. (2011): *Solutions to Time-Fractional Diffusion-Wave Equation in Spherical Coordinates*, Acta Mechanica et Automatica 5(2), 108–111.
- Skruch P. (2011a): *Application of model-based approach for testing dynamic systems*, Automatyka In press.
- Skruch P. (2011b): *A coverage metric to evaluate tests for continuous-time dynamic systems*, Central European Journal of Engineering 1(2), 174–180.
- Skruch P., Panek M., Kowalczyk B. (2011): *Model-based testing in embedded automotive systems*, [w:] Zander-Nowicka J., Schieferdecker I., Mosterman P. (red.), Model-Based Testing for Embedded Systems, 293–308, CRC Press.
- Utting M., Legeard B. (2006): *Practical Model-Based Testing: A Tools Approach*. Morgan Kaufmann, San Francisco, USA.
- Walko J. (2006a): *Home Control*, Computing Control Engineering Journal 17(5), 16–19.
- Walko J. (2006b): *Wireless standards wars*, Communications Engineer 4(2), 8–9.
- Zander-Nowicka J. (2009): *Model-based testing of embedded systems in the automotive domain*, PhD thesis, Technical University Berlin. ■

Control and management algorithms for housing buildings

Abstract: Housing unit is a very complex control process. Mutually exclusive performance indices such as users comfort and energy minimisation causes difficulties in finding a compromise solution. Object physical properties (e.g. temperature distribution in rooms) and presence of certain non deterministic factors (e.g. outside temperature, presence of group of people) cause, that control system needs to constitute of a number of cooperating algorithms (for example for data exchange). From one side temperature control systems should provide comfort for the users, on the other hand it is desired to minimise the costs of control. Optimisation of heating energy needs to consider the presence of people, whether for example a window is open. Also many different control tasks can be

formulated which will improve the safety and comfort of users for example alarms, presence simulation, flooding or fire detection.

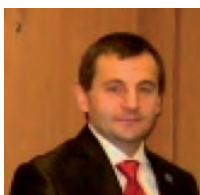
This paper presents the areas investigated in the research project "Control and management algorithms for housing buildings". Initial issues of modelling, wireless home automation networks and system testing problems are considered. Paper ends with conclusions and references.

Keywords: optimal control, intelligent building, optimisation, wireless networks

dr inż. Marek Długosz

Adiunkt w Katedrze Automatyki Wydziału EAIIE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od roku 2011 kierownik grantu naukowo-badawczego, którego tematyka obejmuje sterowanie budynkami mieszkalnymi. Tematyka jego prac badawczy obejmuje zagadnienia sterowania przy wykorzystaniu złożonych układów sterowania oraz zastosowania systemów informatycznych w przemyśle, w szczególności budowy systemów zarządzających pracownikami i jakością produkcji.

e-mail: mdlugosz@agh.edu.pl



dr inż. Paweł Piątek

Adiunkt w Katedrze Automatyki Wydziału EAIIE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zajmuje się projektowaniem i budową systemów sterowania w czasie rzeczywistym, a także wykorzystaniem układów FPGA w systemach sterowania szybkimi obiektami.

e-mail: ppi@agh.edu.pl



dr inż. Jerzy Baranowski

Adiunkt w Katedrze Automatyki Wydziału EAIIE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania badawcze obejmują estymację stanu, układy niecałkowitego rzędu i dynamikę populacyjną. Zajmuje się również zagadnieniami optymalizacji systemów dynamicznych i metodami numerycznymi.

e-mail: jb@agh.edu.pl



dr inż. Paweł Skruch

Adiunkt w Katedrze Automatyki Wydziału EAIIE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obszar jego zainteresowań naukowych obejmuje teorię sterowania, układy dynamiczne, modelowanie matematyczne i symulacje komputerowe.

e-mail: skruch@agh.edu.pl

