

---

# Budynek inteligentny – hybrydowy system energetyczny

---

Marcin Bugaj, Roman Domański

---

## ABSTRAKT

Celem tej publikacji jest zaprezentowanie inteligentnego budynku Politechniki Warszawskiej, stanowiącego m.in. Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych. Obiekt ten wyróżnia się innowacyjnością pod względem złożoności systemu zaopatrującego go w ciepło i energię elektryczną. Jest on wyposażony w rozbudowany układ akwizycji danych, pozwalający na pełną kontrolę procesów energetycznych. Obecnie w budynku prowadzone są badania naukowe oraz zajęcia dydaktyczne dla studentów PW.

Do budowy systemu wykorzystano rozliczne protokoły komunikacyjne oraz standard EIB/KNX. Oprogramowanie ICONICS Genesis 64 SCADA pozwala na pełną wizualizację systemu energetycznego i układu architektonicznego budynku. W ramach publikacji przedstawiono także hybrydowy system energetyczny, oparty na pompach ciepła, węźle ciepłowniczym, kolektorach słonecznych, panelach PV, gruntowych magazynach ciepła, magazynach wodnych oraz z materiałem PCM.

Aktualnie prowadzone są badania mające na celu optymalizację pracy układu dla zmaksymalizowania efektywności energetycznej w ramach lokalnych warunków pogodowych. W publikacji zostaną zaprezentowane także przykładowe wyniki prowadzonych prac.

---

## Wstęp

Zapotrzebowanie energetyczne w obszarze budownictwa składa się z trzech obszarów: elektryczności, ciepła oraz chłodu. Źródła energii odnawialnej, tak jak i magazyny energii, pozwalają na redukcję jej zużycia ze źródeł pierwotnych oraz na zmniejszenie strat energetycznych. Wskazany jest określenie możliwości stworzenia matematycznego i fizycznego modelu, w celu opracowania najbardziej niezależnego energetycznie budynku dla polskich warunków klimatycznych, przykładowo zlokalizowanego w Warszawie. Należy także odpowiedzieć na pytanie, jak powinien wyglądać optymalny system energetyczny dla takiego obiektu, sterowany na podstawie warunków atmosferycznych, aktualnych oraz przewidywanych.

Budynki stanowią jedno z największych odbiorców zarówno energii elektrycznej, jak i ciepła. Dlatego też istnieje ciągła potrzeba poprawy efektywności energetycznej, przy jednoczesnym zachowaniu bądź zwiększeniu komfortu ich użytkowania. W poprawie efektywności cieplnej istotne znaczenie mają zagadnienia akumulacji energii, szeroko omówione w pracy [Domański, 1990].

## Budynki niskoenergetyczne – aspekty prawne w Polsce

Obecna polityka Unii Europejskiej – a co za tym idzie i Polski – jasno skupia się na poprawie efektywności energetycznej oraz obniżeniu zapotrzebowania na energię pierwotną.

Odzwierciedlenie tych działań można znaleźć w dokumentach UE oraz instytucji państwowych, takich jak:

- Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz uchylająca dyrektywę Rady 93/76/EWG;
- Ustawa z 15 kwietnia 2011 r. w sprawie efektywności energetycznej z późn. zm.;
- Krajowy Plan Działań dotyczący efektywności energetycznej, przyjęty przez Komitet Europejski Rady Ministrów w dniu 31 lipca 2007 r.;
- Drugi Krajowy Plan Działań dotyczący efektywności energetycznej, przyjęty przez Radę Ministrów w dniu 17 kwietnia 2012 r.

Zgodnie z art. 3 pkt 1 ustawy o efektywności energetycznej: *„Przez efektywność energetyczną rozumie się stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, niezbędnej do uzyskania tego efektu.”*

Oczywiście efektywność energetyczną można określić na różnych poziomach, w zależności od przyjętej osłony bilansowej. Może się ona odnosić do gospodarki całego kraju bądź też pojedynczych budynków jednorodzinnych. W przypadku tych ostatnich – ocena efektywności energetycznej odniesionej do zużycia energii pierwotnej jest prosta dla układów konwencjonalnych. Natomiast przy zastosowaniu systemów hybrydowych uzyskany efekt powinien być większy niż zużyta energia pierwotna. Porównanie więc samych układów, opartych na źródłach odnawialnych i konwencjonalnych, powinno dotyczyć energii końcowej.

Efektywność energetyczna polskiej gospodarki jest około trzy razy niższa od najbardziej rozwiniętych krajów Europy oraz w przybliżeniu dwa razy niższa od średniej dla krajów UE. Dodatkowo, zużycie energii w Polsce, w odniesieniu do populacji, jest prawie o 40% niższe niż dla krajów EU-15. Oznacza to, iż istnieje duży potencjał dla zastosowania środków pozwalających zwiększyć oszczędności w zużyciu energii w Polsce, co jest typowe dla gospodarek rozwijających się.

Dyrektywa definiuje również energię ze źródeł odnawialnych, jako: *„energię pochodzącą z niekopalnych źródeł odnawialnych, a mianowicie: energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię aerotermalną, geotermalną i hydrotermalną, energię oceanów, hydroenergię, energię pozyskiwaną z biomasy, gazu pochodzącego z wysypisk śmieci, oczyszczalni ścieków i ze źródeł biologicznych (biogaz)”*.

Zmiany do Dyrektywy UE, związane z Charakterystyką Energetyczną Budynków, z 9 czerwca 2010 r., pokazują, iż strategia zmniejszenia energochłonności sektora budowlanego skupia się głównie na promowaniu budynków wysokoefektywnych energetycznie.

Zgodnie z postanowieniami dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2010/31/UE z 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków art. 9, ust. 1: *„Państwa członkowskie zapewniają, aby do dnia 31 grudnia 2020 r. wszystkie nowe budynki były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii oraz po dniu 31 grudnia 2018 r. nowe budynki zajmowane przez władze publiczne oraz będące ich własnością były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii.”*

Przy czym – jako budynek o niemal zerowym zużyciu energii definiuje się „*budynek o bardzo wysokiej charakterystyce energetycznej, określonej zgodnie z załącznikiem, i niemal zerowa lub bardzo niska ilość wymaganej energii powinna pochodzić w bardzo wysokim stopniu z energii ze źródeł odnawialnych, w tym energii ze źródeł odnawialnych wytwarzanej na miejscu lub w pobliżu*”.

Wymogi te są drogą do osiągnięcia jak najniższego możliwego zużycia energii oraz do maksymalizacji niezależności energetycznej. Budynek idealny jest obiektem kompletnie niezależnym, wytwarzającym przynajmniej tyle energii, ile sam konsumuje. Mógłby on oczywiście być kompletnie odcięty od wszelkich dostaw energii bądź oddawać nadwyżki do sieci energetycznej.

Badacze w Polsce pracują nad zdefiniowaniem takiego budynku dla lokalnych warunków klimatycznych. Głównym celem jest obecnie zaprojektowanie obiektu optymalnego pod kątem efektywności energetycznej. Budynek jednakże musi być rozumiany jako pełen zbiór elementów składowych, czyli jako konstrukcja samej budowli wraz ze wszystkimi jego systemami. Oznacza to, iż projekt musi być kompleksowy, z uwzględnieniem możliwości zastosowania odpowiednich źródeł odnawialnych oraz pełnej integracji wszelkich podsystemów. Oczywiście zwiększa to koszty inwestycji, jednakże przynosi wymierne oszczędności w okresie jej użytkowania.

Z doświadczeń autorów wynika, iż niezintegrowane systemy wieloźródłowe, zaimplementowane do nieoptymalizowanej konstrukcji, są nieefektywne. Koszty ich późniejszej optymalizacji, która często nie może być w pełni zrealizowana, oraz nakłady na integrację podsystemów (głównie sterowania) – mogą znacząco podnieść koszt samej instalacji.

Większość budynków nisko- bądź zeroenergetycznych jest zaprojektowana z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii oraz przy założeniu minimalizacji strat ciepła do otoczenia [Clemens-Croome, 1997; Snoonion, 2003; Wong, 2004].

Działania optymalizujące na etapie projektowania pozwalają na dobranie odpowiednich urządzeń, ich parametrów oraz układu akwizycji i sterowania komunikującego się za pomocą jednego protokołu. Przekłada się to na wymierną poprawę efektywności energetycznej oraz ekonomicznej inwestycji. Tego typu podejście pozwala także zwiększyć efektywność wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budownictwie oraz ułatwić ich promowanie.

Ze względu na charakter polskiego klimatu – minimalizacja strat ciepła do otoczenia jest warunkiem krytycznym. Odpowiednia ochrona cieplna pozwala na zmniejszenie ilości energii dostarczanej do budynku oraz obniżenie mocy zainstalowanych źródeł. To z kolei pozwala na zmniejszenie kosztów inwestycyjnych w tym zakresie oraz łatwiejszą implementację urządzeń [Ni, 2002]. Mniejsza moc źródeł przekłada się na lepsze wykorzystanie lokalnych możliwości do użycia energii odnawialnej oraz na uniknięcie konieczności zastosowania urządzeń konwencjonalnych o większej gęstości mocy. Lepsza ochrona termiczna budynku oraz jego większa pojemność cieplna pozwala także na zmniejszenie wielkości magazynów energii bądź uniknięcie konieczności ich rozbudowy.

Opisane wyżej związki oraz polityka Unii Europejskiej, mająca na celu promocję źródeł odnawialnych, znajdują odzwierciedlenie w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki

energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej. Zgodnie z tym dokumentem – wartość współczynników nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla źródeł typu: słońce, wiatr oraz grunt – wynosi zero. Założenie to pozwala na zmniejszenie wartości wskaźnika zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej EP, a co za tym idzie – zbliżenie się do poziomu budynku niskoenergetycznego bądź zeroenergetycznego.

W związku z koniecznością poprawy efektywności energetycznej gospodarki, zmniejszenia negatywnego wpływu działalności człowieka na środowisko oraz zwiększenia oszczędności w zakresie zużycia energii pierwotnej, koniecznym jest stworzenie metodologii łatwego projektowania zoptymalizowanych systemów energetycznych budynków [Granzer, 2012; Hammer, 2003]. Stanowi to jeden z celów badań naukowych, prowadzonych w budynku Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych.

### **Budynek Laboratorium przy ulicy Janka Bytnara „Rudego” w Warszawie**

Budynek Politechniki Warszawskiej przy ulicy Janka Bytnara „Rudego” 25 (ryc. 1.) jest przykładem możliwości wykorzystania hybrydowych systemów energetycznych w nowoczesnym budownictwie. Pierwotnym źródłem ciepła dla obiektu był węzeł cieplny, stanowiący przyłączy do warszawskiego systemu ciepłowniczego (W.S.C.). Po rewitalizacji, zakończonej w 2010 roku, budynek został wyposażony w kompleksowy system oparty na źródłach niekonwencjonalnych.

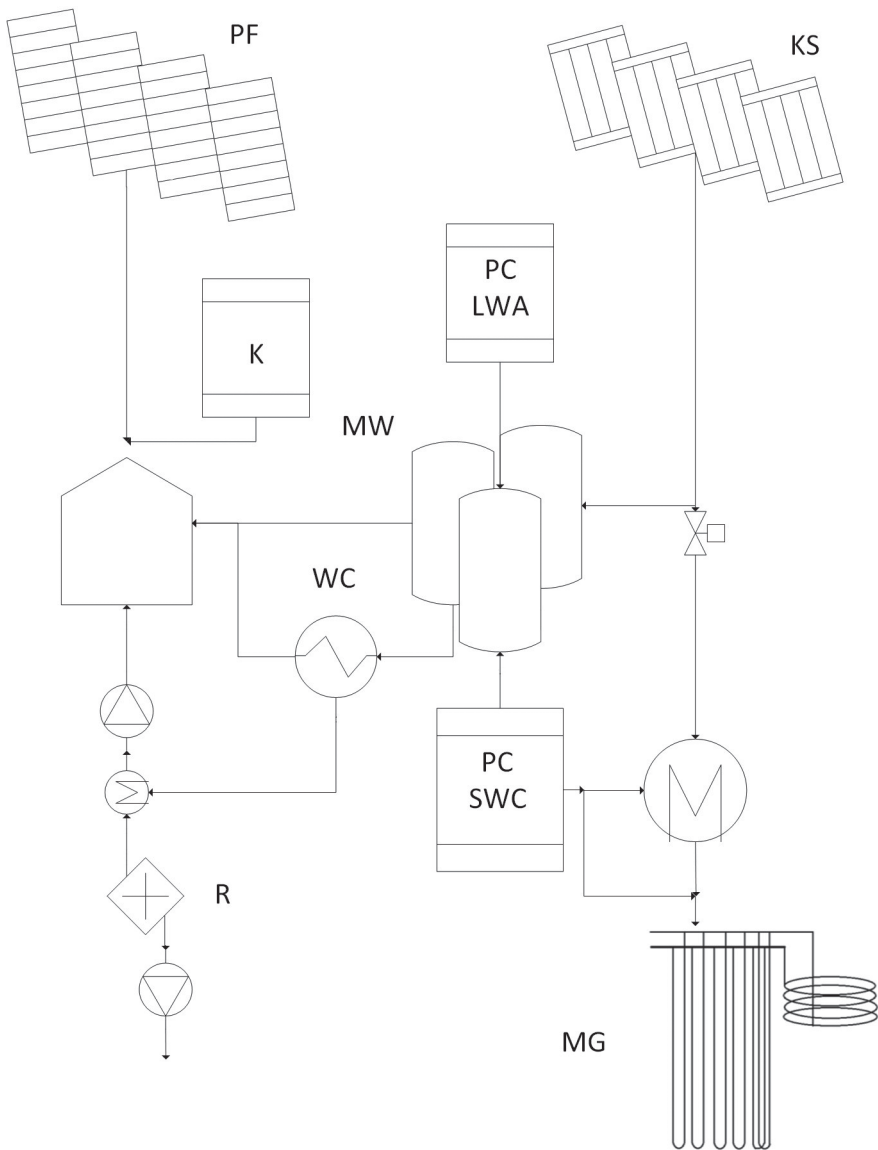
#### **Ryc. 1. Widok budynku Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych**



Władze Politechniki Warszawskiej przeznaczyły budynek na cele dydaktyczne oraz badawcze. Pomysłodawcami projektu byli prof. Domański oraz dr Babut. Obecnie obiekt jest użytkowany przez Wydział Inżynierii Materiałowej oraz przez Uczelniane Centrum Badawcze „Materiały Funkcjonalne”. Konstrukcję budynku charakteryzuje dualizm, wyraźnie widoczny w dwóch głównych jego strefach. Można wyróżnić tutaj część wzniesioną z wykorzystaniem tradycyjnej techniki murarskiej oraz nowoczesnej technologii metalu i szkła. Aspekt ten sam w sobie stanowi obiekt do badań z zakresu energetyki.

Warszawa znajduje się w trzeciej strefie klimatycznej. Szczyci się ona największym systemem ciepłowniczym w Unii Europejskiej. Sieć ta rozpoczyna prace na

Ryc. 2. Schemat systemu energetycznego LZSE



cele zaspokojenia potrzeb energetycznych budynków mieszkalnych w październiku, a zaprzestaje w maju. W okresie całego roku dostarcza ciepłą wodę użytkową (C.W.U.).

System energetyczny budynku przy ulicy „Bytnara” (ryc. 2.) oparty jest na źródle konwencjonalnym, jakim jest węzeł cieplny (WC), oraz na źródłach energii odnawialnej. Do tych

**Ryc. 3. Pompa LWA 120 firmy AlphasinoTec**

drugich zaliczają się dwie pompy ciepła: powietrze – woda (PC LWA) oraz solanka – woda (PC SWC), współpracujące z wymiennikami gruntowymi (MG). Ponadto użytkowane są instalacje kolektorów słonecznych (KS) oraz paneli fotowoltaicznych (PF), zainstalowane na dachu. Źródło chłodu stanowi instalacja klimatyzacji typu VRF (K). Budynek wyposażony jest także w centrale: wentylacyjną – z krzyżowym wymiennikiem rekupeacyjnym (R) oraz liczne magazyny ciepła z materiałem zmiennofazowym PCM (z j. ang. *phase change materials*). Wszystkie źródła ciepła współpracują z wodnymi magazynami ciepła (MG).

Zainstalowana pompa ciepła PC SWC to urządzenie firmy AlphasinoTec, model SWC230, o mocy grzewczej 22,5 kW przy COP (z j. ang. *Coefficient Of Performance*) 4,5 dla parametrów B0/W35. Połączona jest ona z sześcioma gruntowymi wymiennikami ciepła. Pięć z nich stanowią

pionowe wymienniki ciepła o długości 100 m każdy, natomiast ostatni jest to spiralny wymiennik o długości 30 m, zintegrowany z fundamentem budynku. W celach badawczych wykorzystano trzy typy wymienników pionowych. Zastosowano wymiennik typu „U” rura, podwójna „U” rura oraz rura w rurze.

Jednostka PC LWA to urządzenie firmy AlphasinoTec, model LWA 120 (ryc. 3.), o mocy 13 kW i COP 3,4 dla A7/W35. Urządzenie zlokalizowano przy północnej ścianie budynku.

Obie pompy ciepła mają możliwość pracy na cele C.W.U. Układ pozwala na połączenie węzownicy głównego zbiornika C.W.U., o pojemności 400 l, w układzie szeregowym ze zbiornikiem bufora (500 l), co stabilizuje warunki pracy mocniejszej pompy.

Pompy ciepła stanowią także źródła dla systemu centralnego ogrzewania budynku (C.O.). Układ pozwala na ich współpracę z wymiennikiem ciepłowniczym poprzez bufor. Jest to realizowane dzięki ich równoległemu przyłączeniu do zbiornika, ten z kolei połączony jest szeregowo z węzłem cieplnym. Rozwiązanie to umożliwia wykorzystanie źródeł odnawialnych (gruntu i powietrza) do pełnego zaspokojenia potrzeb na ogrzewanie w okresach wiosny oraz jesieni. Natomiast w okresie zimowym WC pracuje jako źródło szczytowe. Płytkowy wymiennik ciepłowniczy o mocy 150 kW ma możliwość pracy jako monowalentne źródło dla systemu. Znamionowe warunki pracy dla węzła od strony instalacji C.O. – to 60/45 °C.

Dolne źródło ciepła MG (ryc. 5.), stanowiące także międzysezonowy magazyn ciepła, zostało zlokalizowane bezpośrednio pod budynkiem. Konstrukcja jego instalacji umożliwia ocenę wpływu zastosowania różnych typów wymienników na ilość ciepła dostarczanego przez pompę. Ponadto układ jest tak zaprojektowany, że w momencie wygrzania C.W.U. do pożądanego poziomu temperatury przez kolektory słoneczne, rozpoczynają one pracę na rzecz regeneracji MG. Proces ten odbywa się przez wymiennik płytowy o mocy 15 kW. Rozwiązanie to pozwala na wykorzystanie dostępnej energii ze słońca przez PC SWC.

Określenie efektywności MG jest obecnie przedmiotem badań. Wstępne wyniki pokazują jednak, iż instalacja regeneracji magazynu gruntowego osiąga średnio 50% sprawności (w odniesieniu do pomierzonych wartości dostępnej energii ze słońca oraz ilości energii dostarczonej do gruntu).

Wymiennik płytowy został zainstalowany na wyjściu z PC SWC (za pompą obiegową), co umożliwia wykorzystanie kolektorów słonecznych jako dolnego źródła ciepła dla jednostki, pozwala też na zagwarantowanie odpowiedniej temperatury na wejściu do urządzenia. Zastosowanie regeneracji dolnego źródła (bądź też, określając to inaczej: instalacji zasilania magazynu gruntowego) pozwala na zwiększenie sezonowego współczynnika wydajności cieplnej pompy solanka – woda.

Wspomniana instalacja KS (ryc. 6.) składa się z pięciu płaskich jednostek WATT 3000 S, o powierzchni 2,057 m<sup>2</sup> każdy, przy powierzchni absorbera 1,852 m<sup>2</sup>.

**Ryc. 4. Widok jednofunkcyjnego, kompaktowego węzła firmy Danfoss**



**Ryc. 5. Kolektory układu pionowych wymienników gruntowych**



**Ryc. 6. Kolektory słoneczne**



Na dachu umieszczone są także 4 urządzenia, wykonane w technologii próżniowej, WATT CPC 9 o powierzchni 2,1 m<sup>2</sup> każdy oraz powierzchni absorbera 1,92 m<sup>2</sup>. Instalacja mieści się na najwyższym dachu budynku i ustawiona jest na południe pod kątem 45°. Kolektory połączone są z 500-litrowym zbiornikiem C.W.U. Zastosowano zawór trójdrożny, który pozwala na zmianę punktu odbioru ciepła z instalacji. W przypadku temperatury zasilania poniżej wymaganej dla C.W.U. bądź w okresie, gdy zbiorniki C.W.U. są wygrzane – zawór przekierowuje przepływ na wymiennik płytowy instalacji zasilania magazynu gruntu.

Na najwyższym dachu budynku umieszczono także instalacje PF. Trzy panele fotowoltaiczne, składające się z pięciu modułów każdy, zostały zamontowane na trzech systemach



nadażnych, jednoosiowych. Panele skierowane są w stronę południową, ze stałym pochyleniem  $30^\circ$ . Układy nadażne firmy DegerToptraker śledzą pozorną wędrówkę słońca w ciągu dnia.

W instalacji wykorzystano trzy różne technologie ogniw fotowoltaicznych (ryc. 7.). Pierwszy panel składa się z modułów hybrydowych Sanyo HIT (ogniwa monokrystaliczne wraz z cienką warstwą krzemu amorficznego). Moc panelu to  $1,25 \text{ kWp}$ . Drugi panel oparty jest o technologię krzemu polikrystalicznego, a zainstalowane moduły IBC POLYSOL 200 VG charakteryzuje moc sumaryczna na poziomie  $1 \text{ kWp}$ . Ostatni, trzeci panel – to moduły amorficzne Sulfurcell SCG57, o łącznej mocy  $0,25 \text{ kWp}$ .

Na trzecim piętrze budynku zlokalizowano magazyn energii, złożony z akumulatorów żelowych TOYAMA NPG12. Panel polikrystaliczny połączony jest z czterema równoległe spiętymi bateriami, o pojemności  $200 \text{ Ah}$  każda, dwoma regulatorami ładowania oraz inwerterem  $1 \text{ kW}$ . Panel amorficzny ma dedykowany magazyn, złożony z dwóch baterii po  $90 \text{ Ah}$ , spiętych szeregowo, regulator ładowania oraz inwerter o mocy  $0,3 \text{ kW}$ . Natomiast panele hybrydowe posiadają magazyn o łącznej pojemności  $400 \text{ Ah}$ , regulator oraz inwerter  $1 \text{ kW}$ . Instalacja jest wykorzystywana głównie do celów naukowych.

W celach badawczych w wybrane elementy konstrukcyjne budynku zaimplementowano także materiał zmiennofazowy. Wykorzystanie substancji, dla której zachodzi przemiana fazowa, przykładowo w temperaturze  $26^\circ\text{C}$ , pozwala na zwiększenie pojemności cieplnej budynku. Przekłada się to na wartość stałej czasowej budynku, zmniejszając wahania temperatury wewnętrznej.

Obecnie w obiekcie znajdują się trzy lokalizacje, w których zastosowano ten typ materiału. Są to: ściana korytarza na trzecim piętrze, jastrych ogrzewania podłogowego w głównej sali wykładowej oraz wolnostojąca ścianka o wysokości jednego metra. Wszystkie te obiekty wykonano w sposób umożliwiający porównanie efektu pracy elementu tradycyjnego z materiałem PCM. Przykładowo: tynk ściany korytarza na trzecim piętrze ma dwa pola o tych samych wymiarach i warunkach ekspozycji na promieniowanie słoneczne, umieszczone obok siebie. Oba pola doposażono w sondy pomiarowe, umożliwiające pomiar temperatury na grubości tynku. We wszystkich aplikacjach wykorzystano materiał Micronal 110.

Dodatkowo budynek wyposażony jest w system wentylacji z wymiennikiem krzyżowym R firmy VBW oraz instalację klimatyzacji K firmy Mitsubishi. Do przeszklenia budynku

**Ryc. 7. Panel fotowoltaiczny z modułami Sanyo HIT**



zastosowano okna Pilkington Insulight o podwyższonej zawartości żelaza. Pozwalają one na zmniejszenie transmisji promieniowania cieplnego do poziomu 28%, przy zachowaniu transmisji światła widzialnego na poziomie 58%.

### Wdrożenie systemu akwizycji

W wyniku szybkiego rozwoju technologii odnawialnych źródeł energii oraz innych systemów budynkowych problem sterowania oraz przekazu informacji zaczął narastać [Granzer, 2012; Hammer, 2003; Kastner, 2005; Loseto, 2012; Ni, 2012; Wu, 2005]. Sama charakterystyka pracy wieloźródłowego systemu, wraz z magazynowaniem energii, wymusza pełną automatyzację procesu. Systemy pozwalające na rozwiązanie tychże problemów są określane mianem zaczerpniętym z języka angielskiego: *Integrated Building Management System* (IBMS). Nazwa ta odnosi się do pełnej integracji wszystkich systemów i podsystemów, w które wyposażony jest budynek. Wcześniejszy etap to *Building Management System* (BMS), integrujący tylko niektóre jego funkcje.

Pełne powiązanie układów pozwala na całkowitą komunikację pomiędzy systemem transportu wewnętrznego, dozoru, teletechnicznym, energetycznym czy też wideo-monitoringu. Przykładowo: umożliwia to wykorzystanie informacji z poszczególnych systemów do określenia charakterystyki obciążenia użytkowego budynku i optymalizacji procesów energetycznych.

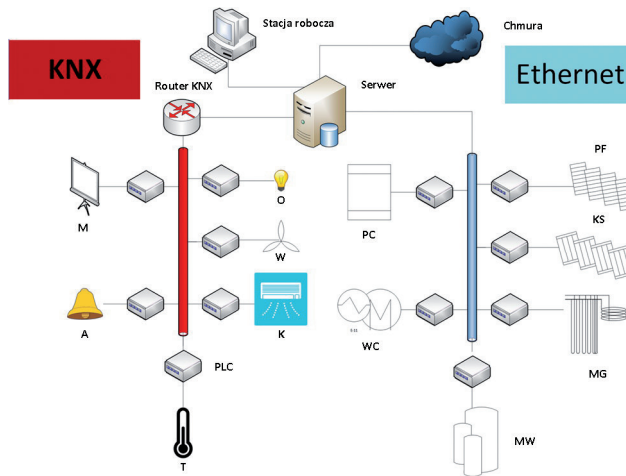
Istnieje także pojęcie *Intelligent Integrated Building Management System* (IBMS), odnoszące się do systemów inteligentnych. Rozwiązania te wykorzystują algorytmy eksperckie, sieci neuronowe i im podobne. Można powiedzieć, iż po „naucze” funkcjonowania obiektu i jego otoczenia - układy sterowania są w stanie podejmować autonomicznie złożone sekwencje decyzji, prowadzące do zaimplementowanego wcześniej celu. Jednakże w obecnych realiach budynkami inteligentnymi określa się już obiekty wyposażone w sam układ BMS.

W procesie rewitalizacji budynku dokonano implementacji systemu BMS KNX EIB [Loseto, 2012].

W celu osiągnięcia pełnej integracji obiekt został wyposażony w platformę SCADA, opartą na 64-bitowym oprogramowaniu Ghenesis 64 firmy Iconics. Dzięki zastosowaniu rutera KNX i wykorzystaniu serwerów OPC, możliwym było odczytanie licznych protokołów występujących w budynku (BacNet, Modbus, Mbus, KNX itd.). Obecnie nie osiągnięto jeszcze pełnej integracji struktury. Schemat poglądowy instalacji został przedstawiony na rycinie 8.

Użytkowany system opiera się na programowalnych kontrolerach logicznych (PLC), aktuatorach wykonujących poszczególne operacje, rozlicznych czujnikach temperatury, prędkości przepływu płynów, ruchu oraz układach akwizycji danych. Zaimplementowane oprogramowanie pozwala na zbieranie, wizualizację oraz zapis danych w czasie rzeczywistym. Umożliwia także kontrolę procesów energetycznych. W przypadku awarii systemu bądź jego odłączenia, poszczególne podsystemy pracują nadal autonomicznie. Dane są archiwizowane w bazach SQL, pozwalających na łatwe nimi zarządzanie.

Ryc. 8. Schemat poglądowy instalacji akwizycji danych



Sterowniki KNX/EIB zostały rozlokowane w rozdzielnicach systemu elektroenergetycznego, teletechnicznego i grzewczego budynku. W każdym pomieszczeniu znajduje się panel sterujący wraz z czujnikiem temperatury, pozwalający na sterowanie przez użytkownika oświetleniem (O), ogrzewaniem (T), klimatyzacją (K), kurtynami oraz poszczególnymi multimediami (M) w przypadku sal wykładowych. Ponadto system steruje także wentylacją (W). Dodatkowo został wyposażony w stację pogodową, umieszczoną na dachu budynku. Z poziomu oprogramowania Genesis można sterować wszystkimi podsystemami zintegrowanymi w KNX oraz wykorzystać poszczególne sygnały z tego układu w innych podsystemach.

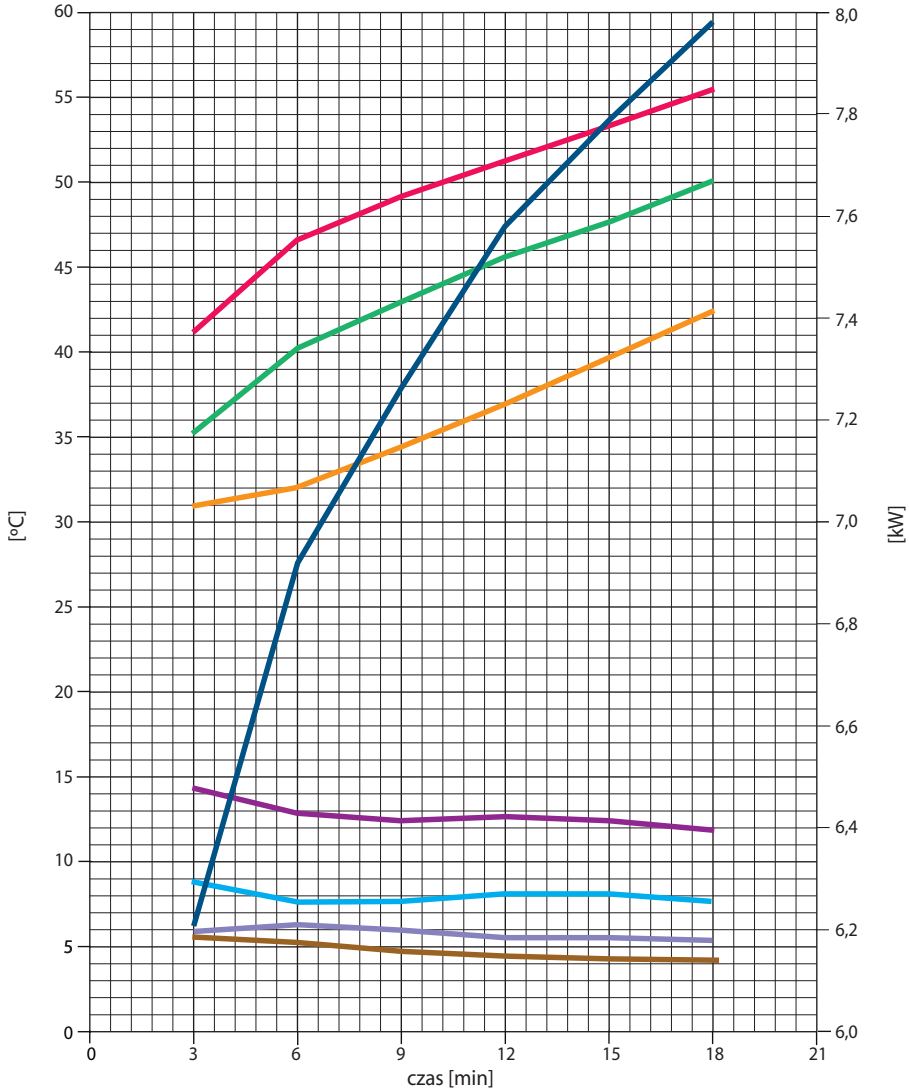
Całość komunikacji jest możliwa dzięki zastosowaniu magistrali KNX oraz sieci Ethernetowej. Te dwie drogi przesyłu informacji pozwalają na pełną integrację wszystkich podsystemów. Wszystkie informacje przechodzą przez serwerownię, zlokalizowaną na pierwszym piętrze budynku.

Ponadto w celach badawczych uzupełniono system o 60 punktów pomiarowych temperatury, 20 punktów pomiaru przepływu cieczy oraz jeden gazów. Zastosowano do tego moduły pomiarowe MOXA ioLogik 1260, przepływomierze PoWoGaz, przetworniki przepływu Lumel oraz przetworniki napięcia i natężenia Lumel.

### Badania prowadzone w Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych

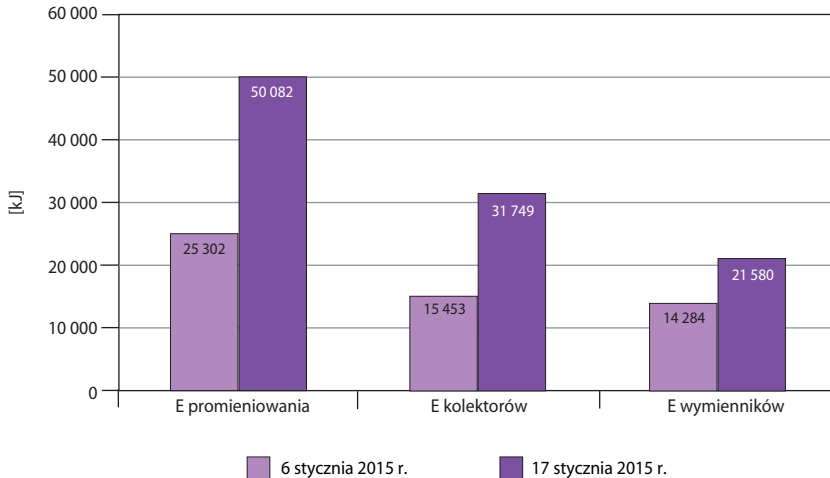
Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych już na etapie projektowania budynku zostało przewidziane do pełnienia funkcji zarówno dydaktycznej, jak i czysto badawczej. Budynek wyposażono w multimedialne sale wykładowe oraz umożliwiono studentom prowadzenie badań na systemie energetycznym normalnie funkcjonującego obiektu.

**Ryc. 9. Przykładowe przebiegi temperatury i mocy dla pompy ciepła SWC 230, działającej na cele C.W.U.**



- tz – temperatura zasilania do górnego źródła
- t C.W.U. – temperatura w górnym źródle
- tp – temperatura powrotu z górnego źródła
- td1 – temperatura zasilania z dolnego źródła
- tz-tp – spadek temperatury w górnym źródle
- td2 – temperatura powrotu do dolnego źródła
- td1-td2 – przyrost temperatury w dolnym źródle
- P – pobierana moc elektryczna

**Ryc. 10. Energia promieniowania słonecznego, dostarczona od kolektorów słonecznych oraz przekazana do gruntu przez układ regeneracji dolnego źródła**



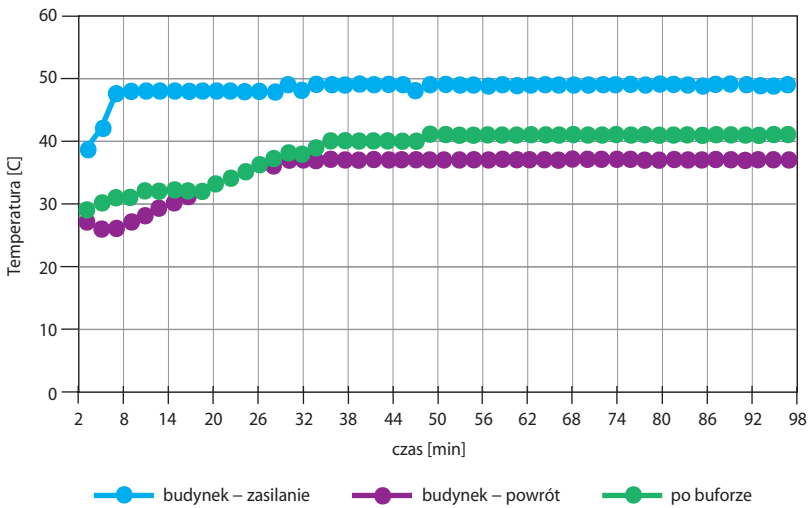
Obecnie w laboratorium prowadzone są przedmioty w ramach studiów na kierunku Energetyka oraz Power Engineering Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa. Zajęcia obejmują swym zakresem każdy z wymienionych wcześniej elementów składowych systemu energetycznego. Obiekt jest także miejscem badań dyplomowych, zarówno inżynierskich, magisterskich, jak i doktorskich.

Podczas normalnych zajęć studenci prowadzą badania pozwalające na identyfikację parametrów poszczególnych procesów energetycznych oraz samych urządzeń. Jednym z przykładowych działań jest wyznaczanie charakterystyki pracy pompy solanka – woda, pracującej na potrzeby C.W.U. bądź C.O. Przykładowe wyniki z pomiarów dla trybu wygrzewania zbiornika C.W.U. przedstawiono na rycinie 9.

Dotychczasowe działania pozwoliły wstępnie określić sprawność energetyczną układu magazynowania energii słonecznej w gruncie. Jak już wspomniano, wartość ta wynosi ok. 50%. Pomiary w instalacjach, których poszczególne elementy składowe charakteryzują się silnym zróżnicowaniem pod względem bezwładności cieplnej, wymusza przedstawianie wyników w formie uśrednionej. Wymaga to dłuższych okresów pomiarowych. Na rycinie 10. przedstawiono przykładowe wartości dostarczonej energii przez system regeneracji dolnego źródła dla dwóch wybranych dni styczniowych.

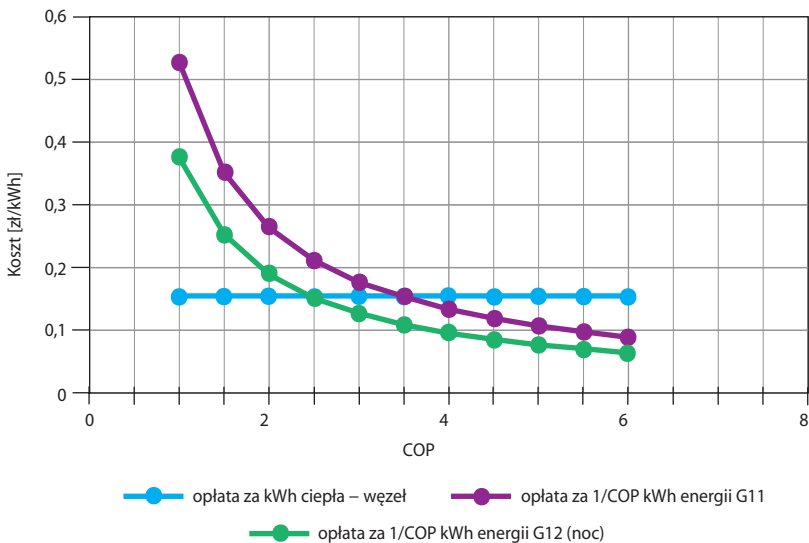
Pierwsze badania pozwoliły także na dobranie parametrów systemu C.O. i optymalizację współpracy układu pompy ciepła SWC oraz wymiennika ciepłowniczego. Na rycinie 11. przedstawiono przebieg temperatury w poszczególnych punktach systemu, którego uproszczony schemat zaprezentowano na rycinie 3. Niedługi okres prowadzonej akwizycji danych (blisko rok) nie pozwala jeszcze na wyciągnięcie pełnych wniosków jedynie na podstawie zebranych danych pomiarowych.

**Ryc. 11. Przebiegi temperatury dla systemu wieloźródłowego**

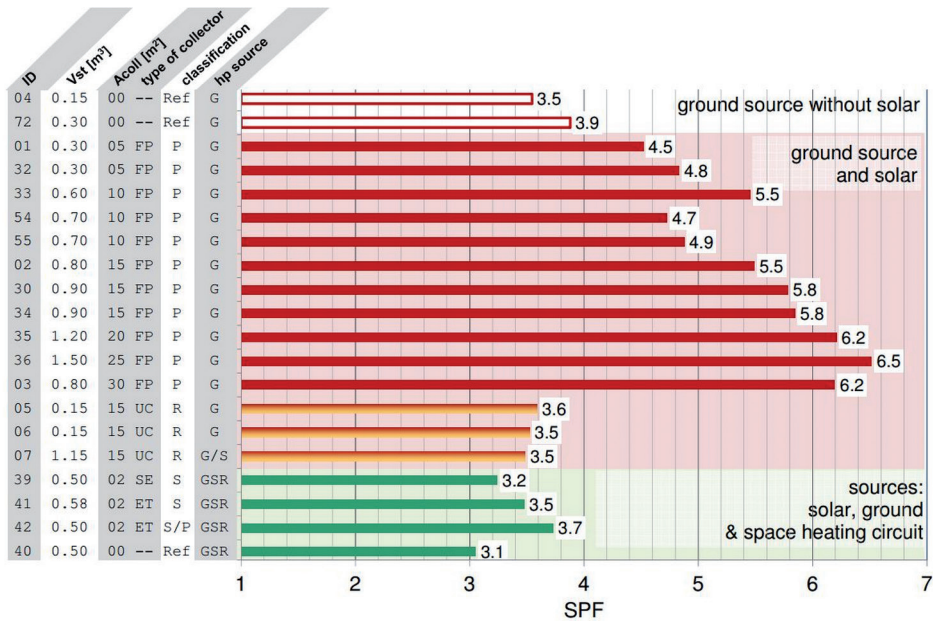


Z przeprowadzonych obliczeń wynika, iż dla wartości sezonowego współczynnika wydajności ciepłej pompy ciepła SPF (z j. ang. *Seasonal Performance Factor*) powyżej wartości 3,5 – ciepło dostarczane do budynku z tego źródła jest tańsze niż w przypadku węzła ciepłego (ryc.12.). Kalkulacji dokonano na podstawie standardowych taryf za energię elektryczną G11 i G12, przy założeniu stałych opłat za składniki stałe.

**Ryc. 12. Wartość SPF pompy ciepła a koszt ciepła**



Ryc. 13. Wartości SPF dla dolnych źródeł połączonych z instalacją kolektorów słonecznych



Posiłkując się wynikami badań Pana Michaela Y. Hallera i jego zespołu – ryc. 13. [Haller, 2014], można wnioskować, iż dla istniejącej instalacji, nieoptymalnej pod względem mocy pompy ciepła, jej wykorzystanie w układzie szeregowym z węzłem może jednak przynieść oszczędności. Będzie to możliwe dzięki wykorzystaniu regeneracji dolnego źródła. W przypadku taryfy G12 dla obecnego systemu oraz charakterystyki zużycia ciepła w budynku, roczne oszczędności mogłyby wynosić nawet 2 400 zł (licząc w ujęciu rocznym dla SPF).

Oczywiście wartość COP pompy ciepła dla danej chwili w sezonie grzewczym jest uzależniona m.in. od zmiennych warunków pogodowych i czasu jej pracy. Jednocześnie całkowity koszt jednostkowy (koszty stałe oraz zmienne w przeliczeniu na jednostkę) ciepła czy też energii elektrycznej – zależy od jego zużycia. Zmniejszając ilość pobranego ciepła z W.S.C., zwiększamy opłacalność użycia pompy ciepła. Niestety ze względu na zmianę COP nie zawsze przełoży się to na rzeczywiste oszczędności. Dlatego też optymalnym kryterium doboru jednostki zasilającej w ciepło byłby wskaźnik wyliczony w czasie rzeczywistym dla danej instalacji, uwzględniający jednocześnie historię zużycia energii oraz zmienne COP.

Relacja dla poszczególnych miesięcy, pomiędzy całkowitym kosztem jednostkowym za energię elektryczną i ciepło w sezonie 2012/2013 (18.10.2012 – 15.03.2013), zmieniała swą wartość w zakresie 2,4-4,4.

Prowadzone badania pozwalają na poszerzenie wiedzy z zakresu pracy hybrydowych systemów energetycznych budynku w warunkach warszawskich. Laboratorium

Zrównoważonych Systemów Energetycznych pozwala na kształcenie studentów przez zajęcia praktyczne na rzeczywistym obiekcie.

### **Wnioski oraz planowane działania**

W ramach działań Politechniki Warszawskiej powstało Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych, stanowiące przykład wykorzystania hybrydowych systemów energetycznych w budownictwie. W rzeczywistości funkcjonującym obiekcie udało się zbudować instalację badawczą, umożliwiającą studentom wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa prowadzenie obserwacji procesów energetycznych w systemie opartym zarówno o źródła konwencjonalne, jak i energii odnawialnej.

Dotychczasowe doświadczenia pokazują, iż możliwym jest funkcjonowanie nietypowego układu źródeł, jaki stanowi połączenie pomp ciepła z węzłem ciepłowniczym. Ponadto przy wyposażeniu obiektu w układ regeneracji dolnego źródła kolektorami słonecznymi – umożliwiono poprawę wskaźnika COP pompy ciepła. Efektem czego wzrosła jej konkurencyjność względem węzła ciepłowniczego.

Obecnie trwają prace instalacyjne mające na celu doposażenie omawianego układu w moduły PVT. Będą one stanowić źródło ciepła dla magazynu gruntowego, jak i energii elektrycznej dla systemów budynku. Będzie to skutkowało redukcją zużycia energii pierwotnej. Prowadzone prace pozwolą stwierdzić, czy odpowiedni dobór wielkości poszczególnych elementów układu umożliwi stworzenie systemu energetycznego budynku zarówno tańszego w eksploatacji, jak i zużywającego mniej energii pierwotnej niż układ podłączony do W.S.C.

Ponadto, obecnie głównym zadaniem jest stworzenie modelu matematyczno-fizycznego systemu hybrydowego w celach symulacji jego pracy w okresie dwudziestoletniego użytkowania. Pozwoli to na określenie efektywności regeneracji dolnego źródła. Odpowie także na pytania, jaka jest sezonowa wydajność ciepła pompy ciepła solanka – woda oraz jak wygląda jej zmiana w kolejnych latach. Te informacje natomiast pozwolą określić wysokość ewentualnych oszczędności, wynikających z zastosowania układu hybrydowego.

Jednocześnie dane z rzeczywistego obiektu oraz wyniki symulacji umożliwią stworzenie algorytmu doboru parametrów system energetycznego budynku zeroenergetycznego, użytkowanego w warszawskich warunkach środowiskowych.

Dalszym etapem jest opracowanie hierarchicznego modelu zarządzania pracą wszystkich systemów w oparciu o monitorowanie lokalnych warunków pogodowych. Pozwoli on na optymalne sterowanie pracą licznych źródeł odnawialnych, magazynów energii oraz źródeł konwencjonalnych. Odpowiedni algorytm jest warunkiem krytycznym do osiągnięcia założonego celu – stworzenia budynku w pełni autonomicznego energetycznie.

Obecnie kombinacja rozbudowanej sieci przesyłu informacji, BMS-u oraz licznych sterowników, czujników i aktuatorów, pozwala na prowadzenie badań oraz zajęć dydaktycznych w Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych. Jednocześnie zachowany został pełen komfort użytkowania budynku. Pozwala to na zbieranie danych z rzeczywistości funkcjonującego obiektu.



Otrzymane wyniki pozwolą na opracowanie optymalnych rozwiązań energetycznych na etapie projektowym inwestycji. Umożliwią poprawę efektywności energetycznej oraz wypełnienie założonych celów zmniejszenia zużycia energii ze źródeł pierwotnych. Jednocześnie możliwa będzie poprawa efektywności ekonomicznej planowanych zamierzeń budowlanych.

## Bibliografia

- Clements-Croome, T.D.J., 1997, *What do we mean by intelligent buildings?*, „Automation in Construction”, Vol. 6; DOI: 10.1016/S0926-5805(97)00018-6.
- Domański R., 1990, *Magazynowanie energii cieplnej*, PWN, Warszawa.
- Granzer, W., Kastner, W., 2012, *Information modelling in heterogeneous Building Automation Systems*, IEEE International Workshop on Factory Communication Systems-Proceedings; DOI: 10.1109/WFCS.2012.6242577.
- Haapio, A., Viitaniemi, P., 2008, *A critical review of building environmental assessment tools*, “Environmental Impact Assessment Review”, Vol. 28; DOI: 10.1016/j.eiar.2008.01.002.
- Haller M. Y. Haller, Carbonell D., Mojic I, et al., 2014, *Solar and heat pump systems – summary of simulation results of the IEA SHC Task 44/hpp annex 38*, 11th IEA Heat Pump Conference, May 12-16 2014, Montreal (Quebec) Canada.
- Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Müller, R., Beyer, H.G., 2003, *Solar energy assessment using remote sensing technologies*, “Remote Sensing of Environment”, Vol. 86; DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00083-X.
- Heerwagen, J., 2000, *Green buildings, organizational success and occupant productivity*, “Building Research and Information”, Vol. 28.
- Kastner, W., Neugschwandtner, G., Soucek, S., Newman, H.M., 2005, *Communication systems for building automation and control*, “Proceedings of the IEEE”, Vol. 93; DOI: 10.1109/JPROC.2005.849726.
- Loseto, G., Scioscia, F., Ruta, M., Di Sciascio, E., 2012, *Semantic-based smart homes: A multi-agent approach*, “CEUR Workshop Proceedings”, Vol. 892.
- Matijevics, E., 2011, *Measurement data collecting into databases from KNX systems*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Proceedings.
- McCartney, K.J., Fergus Nicol, J., 2002, *Developing an adaptive control algorithm for Europe*, “Energy and Buildings”, Vol. 34; DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00013-0.
- Ni, H., Heydt, G.T., Mili, L., 2002, *Power system stability agents using robust wide area control*, “IEEE Transactions on Power Systems”, Vol. 17.

Snoonian, D., 2003, *Smart buildings*, "IEEE Spectrum", Vol. 40; DOI: 10.1109/MSPEC.2003.1222043.

Wong, J.K.W., Li, H., Wang, S.W., 2005, *Intelligent building research: A review*, "Automation in Construction", Vol. 14, Issue 1, January 2005; DOI: 10.1016/j.autcon.2004.06.001.

Wu, F.F., Moslehi, K., Bose, A., *Power system control centers: Past, present, and future*, "Proceedings of the IEEE", Vol. 93; DOI: 10.1109/JPROC.2005.857499.

---

#### Intelligent building – hybrid energy system

#### ABSTRACT

The aim of this paper is to present new Warsaw's University of Technology smart building. Innovation includes solutions of electricity and heat supply of the building and smart metering system developed by our team. The system allows to control energy flow in the building and operate energy supply installation. The novel aspect is connecting EIB/KNX system with ICONICS Genesis 64 SCADA software in very simple and affordable way. In the article authors present also results of different scientific research, like solar energy conversion, heat pumps and hybrid energy systems.

---

---

**mgr inż. Marcin Bugaj** – kierownik Laboratorium Zrównoważonych Systemów Energetycznych, asystent w Zakładzie Termodynamiki Wydziału MEiL PW; specjalizuje się w hybrydowych systemach energetycznych budynków; kontakt: Instytut Techniki Ciepłej, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, e-mail: marcin.bugaj@itc.pw.edu.pl

**prof. dr hab. inż. Roman Domański** – Przewodniczący Rady Naukowej Instytutu Lotnictwa, Wiceprzewodniczący Komitetu Termodynamiki i Spalania; specjalizuje się m.in. w zagadnieniach konwersji i magazynowania energii; kontakt: Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, Warszawa, e-mail: roman.domanski@ilot.edu.pl