

Studium przypadku – budynek MLBE Politechniki Krakowskiej jako przykład perspektywicznego spojrzenia na funkcjonalności budynków

Abstrakt: W 2014 r. oddano do użytkowania budynek Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej (MLBE). W MLBE znajdują się laboratoria badawcze technologii budowlanych, a sam budynek, wraz z instalacjami technicznymi, również pozostaje obiektem badań. Dziesięć lat po jego powstaniu, w ramach projektu Obserwatorium Transformacji Energetycznej (OTE), przeprowadzono ewaluację wartości wskaźnika SRI dla budynku. Obiekt uzyskał najwyższą ocenę spośród wszystkich budynków przebadanych w tej fazie testów w Polsce. Pokazuje to, że twórcy koncepcji MLBE skutecznie przewidzieli kierunki rozwoju funkcjonalności budynków.

Słowa kluczowe: MLBE PK, SRI, wskaźnik gotowości budynku do inteligencji, inteligentny budynek

Wprowadzenie

Idea budynku, który sam stanowiłby obiekt badań – pod kątem właściwości fizycznych, parametrów komfortu, instalacji technologicznych, strategii sterowania, a także materiałów budowlanych, nowych technologii oraz innych czynników mających wpływ na jego funkcjonowanie i zapewnienie wygody użytkownika przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów utrzymania – pojawiła się na Politechnice Krakowskiej pod koniec pierwszej dekady XXI wieku. Autorami pomysłu byli dr hab. inż. arch. Marcin Furtak oraz dr hab. inż. Małgorzata Fedorczak-Cisak. Idea zmaterializowała się w 2014 r., gdy na kampusie Politechniki Krakowskiej oddano do użytku budynek Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego (MLBE). Po dziesięciu latach, w 2024 r., budynek został poddany ewaluacji wartości wskaźnika gotowości do inteligencji (*smart readiness indicator* – SRI). Wskaźnik SRI służy do oceny spełniania przez budynki wymagań zdefiniowanych w dyrektywie EPBD 2018 (w artykule przyjęto, że kolejne wersje

dyrektywy EPBD będą oznaczane skrótem i rokiem uchwalenia dokumentu) i obejmujących trzy grupy wymagań: właściwości użytkowe budynku, jakość obsługi potrzeb użytkowników oraz zdolność do elastyczności energetycznej. Do właściwości użytkowych budynku zalicza się efektywność energetyczną oraz pewność działania, w tym wczesne wykrywanie możliwości wystąpienia usterki. Kategoria jakości obsługi potrzeb użytkowników obejmuje dotrzymanie warunków komfortu, wygody, zachowania zdrowia i dobrego samopoczucia oraz dostarczanie użytkownikom informacji o funkcjonowaniu budynku, w szczególności o bieżących kosztach użytkowania. Do kategorii elastyczność energetyczna zalicza się posiadanie przez budynek własnych źródeł energii odnawialnej oraz magazynów energii cieplnej i elektrycznej, zdolność do współdziałania z inteligentnymi sieciami zasilającymi, a także zdolność do ograniczania zapotrzebowania na energię, gdy jest ona droga lub niedostępna. Wskaźnik gotowości budynku do inteligencji służy właśnie do oceny, w jakim stopniu budynek spełnia te wymagania. Idea wskaźnika została zaproponowana przez Parlament Europejski i Radę w dyrektywie EPBD z roku 2018 (Directive (EU) 2018/844). Na podstawie dalszych decyzji Komisji Europejskiej (opisanych w niniejszym zeszycie w artykule *Metodyka ewaluacji wskaźnika gotowości budynków do inteligencji (SRI)*) pod egidą Dyrekcji Generalnej ds. Energii Komisji Europejskiej (DG ENER) utworzono Zespół wsparcia SRI (SRI Support Team) i rozpoczęto fazę testowania metodologii wskaźnika w państwach członkowskich UE.

Podczas pierwszego etapu testów, prowadzonych w Polsce od kwietnia 2024 r. w ramach projektu

Obserwatorium Transformacji Energetycznej, dokonano ewaluacji wskaźnika m.in. dla budynku MLBE (Kwasnowski 2024). Wartość wskaźnika SRI dla obiektu wyniosła 63,5%, co stanowiło najlepszy wynik uzyskany na pierwszym etapie polskiej fazy testowania i jeden z najwyższych w państwach członkowskich Unii Europejskiej. W artykule autorzy analizują i wyjaśniają, dlaczego budynek, którego idea została zapoczątkowana w czasach obowiązywania drugiej wersji dyrektywy EPBD z 2010 r., uzyskał tak wysoki wynik oceny wskaźnikiem, którego metodologia została zaproponowana dopiero sześć lat po oddaniu budynku do eksploatacji. Na Rys. 1 przedstawiono analizowany budynek.



Rys. 1. Budynek Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej

Założenia projektowe dla budynku MLBE

Podstawowe założenia determinujące projektowanie budynku MLBE, opracowane na podstawie wytycznych zespołu naukowego Politechniki Krakowskiej, miały na celu zaspokojenie potrzeb badawczych

uczelnian i obejmowały cztery wymienione niżej obszary tematyczne.

- 1) Umieszczenie w budynku laboratoriów badawczych doskonale wyposażonych w aparaturę specjalistyczną, w celu prowadzenia wszechstronnych badań dotyczących różnych parametrów materiałów i przegród budowlanych oraz kształtowania parametrów środowiska budynku (klimat, jakość powietrza, oświetlenie) według potrzeb użytkowników. Realizacja tego zamierzenia służyła do zaspokojenia potrzeb zgłaszanych zarówno przez środowiska producentów materiałów budowlanych, jak i wykonawców i użytkowników obiektów.
- 2) Wyposażenie instalacji technicznych budynku w różnego typu alternatywne źródła energii, wraz z magazynami, w celu prowadzenia badań nad zależnością sprawności tych źródeł od czynników zewnętrznych, a także w celu optymalnego sterowania wykorzystaniem źródeł w zależności od aktualnej sprawności oraz zapotrzebowania na energię.
- 3) Wykorzystanie budynku jako unikatowego obiektu doświadczalnego w skali rzeczywistej, przeznaczonego do badań w obszarze szeroko rozumianego budownictwa energooszczędnego, a w szczególności dotyczących zagadnień wpływu środowiska zewnętrznego na parametry klimatu wewnątrz budynku oraz zapotrzebowania na energię do zapewnienia tych parametrów. W tym celu w budynku zastosowano zróżnicowane przegrody zewnętrzne objęte specjalistycznym rozproszonym systemem szczegółowego opomiarowania wybranych fragmentów elementów konstrukcyjnych obiektu. W dalszej części artykułu system ten jest określany jako specjalistyczny system opomiarowania (SSO).
- 4) Wyposażenie budynku w specjalistyczny rozbudowany system sterowania i automatyzacji instalacji technicznych budynku (*building automation control system* – BACS), system sterowania nadzrędnego oraz zbierania i archiwizacji danych (*supervisory control and data acquisition* – SCADA), a także system zarządzania wszystkimi instalacjami

budynku (*building management system* – BMS). Celem zastosowania systemów było umożliwienie badania wpływu różnych algorytmów sterowania wariantowych instalacji technicznych na efektywność energetyczną budynku. Zgodnie z normą PN-EN 15232:2012 założono indywidualne sterowanie parametrami komfortu w każdym pomieszczeniu według zapotrzebowania. W dalszej części artykułu zestaw współdziałających systemów BACS + SCADA + BMS określany jest jako „badawczy system BMS” lub w skrócie – BBMS.

Przy projektowaniu systemów automatyki, sterowania i zarządzania instalacjami technicznymi i funkcjonalnościami budynku oraz unikatowego systemu opomiarowania elementów konstrukcyjnych budynku wykorzystano wyniki prac badawczych realizowanych od połowy lat 90. XX w. pod kierunkiem mgr inż. Pawła Kwasnowskiego w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej w Katedrze Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii w zakresie otwartych systemów sterowania budynkami i stosowania wytycznych zawartych w normie PN-EN 15232:2012 (Hayduk, Kwasnowski 2010; 2011; Kwasnowski 2002; 2013). Efektem tych prac było m.in. sformułowanie przez autora paradygmatów konstrukcji inteligentnych budynków, potwierdzonych wdrożeniami zintegrowanych systemów automatyki i bezpieczeństwa w obiektach Kampusu 600-lecia Odnowienia Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie (Kwasnowski, Hayduk 2011). Ponad 10 lat pozytywnych doświadczeń z eksploatacji obiektów Kampusu UJ stanowiło punkt odniesienia dla rozwiązań badawczego systemu BMS zaprojektowanych dla MLBE.

Rozwiązania instalacji technicznych zastosowane w budynku MLBE

Uwzględniając paradygmaty, które stanowiły podstawę dla systemów sterowania i automatyki,

a także doświadczenia z eksploatacji budynków III Kampusu UJ, przyjęto koncepcję otwartego, hierarchicznego i rozproszonego systemu automatyki budynkowej. Poziom nadrzędny systemu zrealizowano na bazie standardowego oprogramowania klasy SCADA pracującego w środowisku komputerów PC i sieci IP. Na poziomie obiektowym zastosowano rozproszony system sterowania bazujący głównie na sieci LON, z wykorzystaniem również innych bardzo popularnych w budownictwie standardów transmisji danych, takich jak BACnet, M-Bus, Modbus, DALI i OPC. Magistrale obiektowe łączą lokalnie rozmieszczone sterowniki, czujniki i elementy wykonawcze oraz interfejsy użytkownika. W ramach badawczego systemu BMS zintegrowano obszary instalacji HVAC, oświetlenia, przesłon zacieniających oraz systemów bezpieczeństwa. Dzięki integracji sygnały z wielu czujników są przetwarzane i przekazywane w rozproszonej strukturze systemu i wspólnie wykorzystywane przez różne podsystemy budynku. Przykładowo, funkcjonalności typowe dla systemów bezpieczeństwa budynku, takie jak sygnalizacja włamania i napadu oraz kontrola dostępu, są zintegrowane i realizowane bezpośrednio w systemie sterowania i automatyki instalacji technologicznych. Umożliwia to wykorzystanie sygnałów z czujników zajętości pomieszczeń oraz otwarcia drzwi i okien do sterowania parametrami mikroklimatu we wnętrzach w godzinach użytkowania obiektu, a także do zapewnienia bezpieczeństwa budynku w czasie nieobecności użytkowników. Takie podejście jest zgodne z normą PN-EN 15232:2012, która wskazuje, że integracja systemów zarządzania energią z detekcją obecności użytkowników w pomieszczeniach jest kluczowa dla osiągnięcia wysokiej efektywności energetycznej budynku. Dzięki temu możliwe jest sterowanie parametrami mikroklimatu w poszczególnych pomieszczeniach w zależności od ich aktualnego wykorzystania. Umożliwia to precyzyjne dystrybuowanie energii w budynku zgodnie z bieżącym zapotrzebowaniem poprzez dostarczanie jej we właściwym czasie dokładnie do miejsca,

gdzie jest potrzebna (Dechnik, Moskwa 2017; Kwasnowski 2002; 2013).

Ze względu na specyfikę obiektu zaprojektowane instalacje techniczne wraz z systemem BBMS nie były rozwiązaniami standardowymi, lecz zostały znacząco wzbogacone o dodatkowe funkcjonalności ukierunkowane na poszerzenie potencjału badawczego obiektu. Zastosowano innowacyjne rozwiązania instalacji technicznych, w tym układy wielowariantowe. Przykładami mogą być: ogrzewanie budynku z wykorzystaniem pięciu różnego typu źródeł ciepła, a także możliwość oddziaływania na temperaturę wybranych pomieszczeń doświadczalnych przez cztery niezależne emiterzy. Wielowariantowość dotyczy również systemu wentylacji i przesłon zacinających. Dzięki przewidzianym rezerwom w instalacjach dystrybucji nośników energii, modułowości i rozproszeniu systemu automatyki, a także wysokiej zdolności do współdziałania (*interoperability*) badawczego systemu BMS istnieje także możliwość dołączania w celach badawczych dodatkowych urządzeń technologicznych. W strukturze systemu BBMS zastosowano swobodnie programowalne sterowniki lokalne (zgodne ze standardem programowania PLC – IEC 61131-3), połączone siecią komputerową z systemem nadrzędnym, umożliwiające integrację danych obiektowych pochodzących z różnych magistral branżowych, a także wdrażanie i testowanie dowolnych algorytmów sterowania urządzeń. Znacząca jest także liczba monitorowanych parametrów – w całym budynku zintegrowanych jest ponad 3000 czujników (łącznie BBMS i SSO). Pomiary obejmują m.in. temperatury powietrza wewnętrznego, zewnętrznego, gruntu, warstw konstrukcyjnych i izolacyjnych przegród budynku, ciśnienia, wilgotności względnej powietrza, przepływy powietrza, stężenie CO₂, przepływy mediów i ciepła, parametry energii elektrycznej.

Funkcjonalność badawczego systemu BMS rozszerzono także o wydzielony specjalistyczny system opomiarowania SSO (na bazie systemu SCADA) obejmujący m.in. pomiary temperatury

i wilgotności w elementach konstrukcyjnych budynku. SSO umożliwia prowadzenie badań w zakresie fizyki budowli, czyli w takich obszarach jak jakość przegród zewnętrznych, przenikanie ciepła przez przegrody i elementy budowli, akumulowanie ciepła w elementach konstrukcyjnych i innych magazynach energii, działanie i efektywność pomp ciepła i gruntowych wymienników ciepła, efektywność central wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, kształtowanie warunków mikroklimatu w pomieszczeniach i innych.

Sterowanie wszystkimi funkcjami budynku oraz ich programowanie odbywa się za pomocą panelu operatorskiego systemu BBMS. System gromadzi, archiwizuje, wizualizuje i przekazuje informacje diagnostyczne i powiadamia o przekraczaniu parametrów granicznych, czasach włączenia lub wyłączenia oraz awariach urządzeń. Dane ze wszystkich czujników oraz informacje diagnostyczne są rejestrowane i wykorzystywane w pracach badawczych. Lokalna interakcja użytkownika w pomieszczeniach odbywa się za pomocą tradycyjnych przełączników oraz paneli dotykowych. Panele służą do wizualizacji stanu pracy urządzeń i wartości aktualnych parametrów fizycznych oraz pozwalają oddziaływać na urządzenia i nastawiać wartości zadane dla zmiennych fizycznych panujących w pomieszczeniu (m.in. temperatura, wilgotność względna, stężenie CO₂, parametry powietrza wentylacyjnego, stan urządzeń). Panele dostarczają także podstawowych informacji o warunkach pogodowych. Przykład interfejsu użytkownika na panelu w jednym z pomieszczeń MLBE zaprezentowano na Rys. 5.

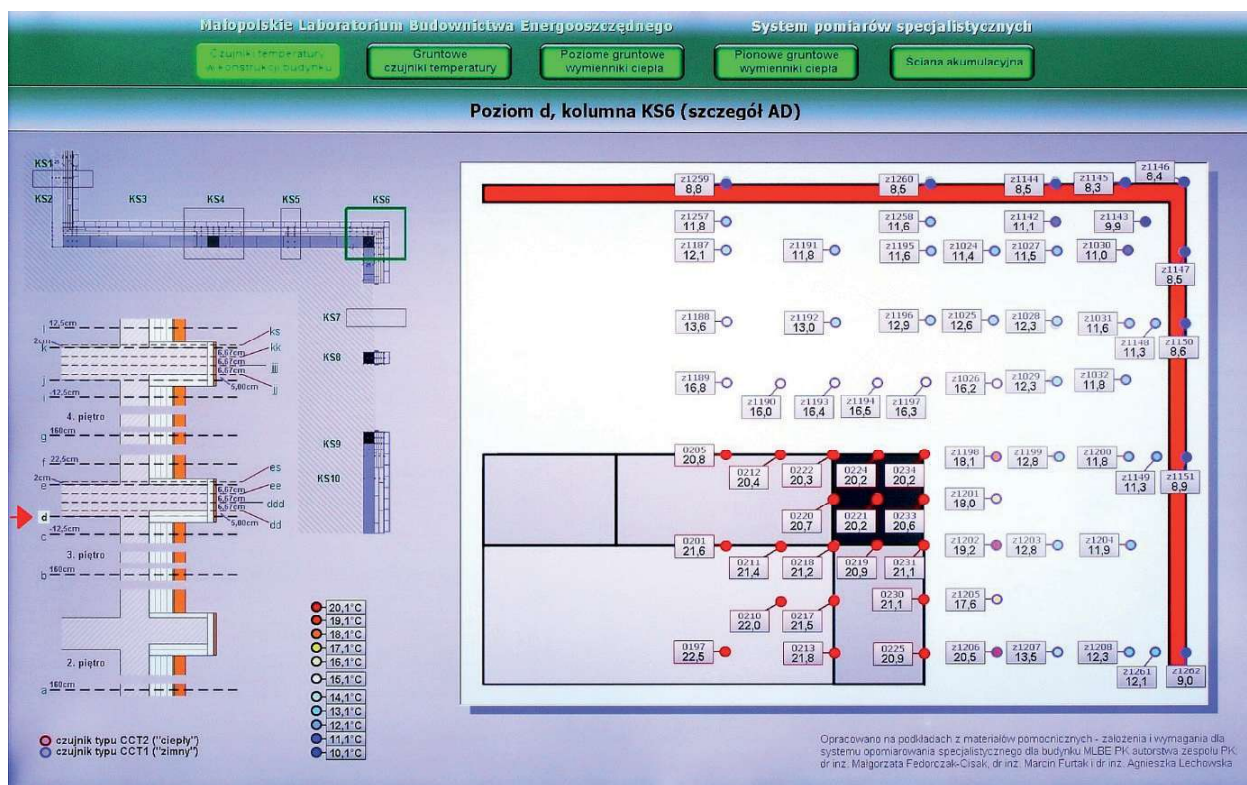
Wcześniej, na Rys. 2 przedstawiono widok stacji operatorskich systemu.

Na kolejnej ilustracji (Rys. 3) przedstawiono wizualizację opomiarowania jednego z narożników płyty stropowej zrealizowanego w ramach specjalistycznego systemu opomiarowania (SSO).

W dalszej części artykułu scharakteryzowano funkcje sterowania i automatyzacji realizowane w ramach poszczególnych instalacji technicznych budynku (Furtak et al. 2014).



Rys. 2. Stacje operatorские zintegrowanego systemu SSO (z lewej – widok opomiarowania gruntu pod budynkiem) i BBMS (z prawej – widok jednej z pomieszczeniowych instalacji HVAC)



Rys. 3. Stacja operatorская SSO – przykład wizualizacji opomiarowania konstrukcji budynku. Po stronie lewej jest widoczna lokalizacja opomiarowania w konstrukcji, po stronie prawej – rozkład temperatur w wybranej warstwie „d” jednego z narożników; położenie warstwy „d” w konstrukcji wskazuje czerwona strzałka w pobliżu środka lewej krawędzi ilustracji

Ogrzewanie i chłodzenie

Instalacja grzewczo-chłodnicza budynku obejmuje pięć źródeł ciepła oraz trzy źródła chłodu, które zasilają magazyny energii w postaci zasobnika wody gorącej i lodowej, o pojemności 1500 litrów każdy. Wśród źródeł znajdują się trzy pompy ciepła z funkcją grzania i chłodzenia (dwie pompy powietrzne/woda z napędem elektrycznym i gazowym oraz pompa gruntowa), a także węzeł MPEC i kocioł gazowy kondensacyjny. Gruntowa pompa ciepła współpracuje z dolnym źródłem, które stanowią trzy pionowe sondy rurowe o głębokości 125 m. Układ ten umożliwia także realizację funkcji chłodzenia pasywnego poprzez odprowadzanie ciepła budynku do gruntu przy wykorzystaniu jedynie pompy obiegowej, bez udziału sprężarki. Ze względu na możliwość prowadzenia różnorodnych badań liczba oraz moc źródeł ciepła i chłodu są przewymiarowane względem zapotrzebowania budynku. Każde ze źródeł może pracować indywidualnie lub urządzenia mogą ze sobą współpracować w różnych konfiguracjach i wariantach harmonogramu pracy, w zależności od aktualnych potrzeb.

Ciepło i chłód zgromadzone w zasobnikach są dystrybuowane do poszczególnych pomieszczeń i stref budynku za pośrednictwem zespołu pomp cyrkulacyjnych, według lokalnego zapotrzebowania na emisję energii. Poszczególne obiegi wyposażono w ciepłomierze dostarczające szczegółowych informacji o bieżącej mocy i parametrach czynnika roboczego. W pomieszczeniach zastosowano lokalne systemy grzewczo-chłodnicze oparte na różnych konfiguracjach urządzeń, takich jak:

- klimakonwektory dwu- i czterorurowe z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej wentylatora,
- układy płaszczyznowe (podłogowe, ściennie, sufitowe),
- belki aktywne i pasywne.

Indywidualna regulacja temperatury na poziomie danego pomieszczenia jest realizowana według sygnału z naściennego czujnika temperatury powietrza,

z uwzględnieniem przyjętych harmonogramów czasowych (np. związanych z badaniami, trybem świątecznym/nocnym czy wstępnym przygotowaniem warunków w pomieszczeniu przed zaplanowanym przybyciem użytkowników) bądź sygnałów o obecności użytkowników. Nastawa temperatury może być również, według potrzeb użytkowników, korygowana ręcznie za pomocą lokalnych paneli dotykowych lub centralnie z poziomu systemu BMS. Systemy płaszczyznowe wyposażono w lokalne pompy mieszające, które pracują ze stabilizacją temperatury czynnika zasilającego. Urządzenia niepodłączone do instalacji odprowadzania skroplin (belki chłodzące) są zabezpieczone przed kondensacją wilgoci poprzez monitoring przekroczenia temperatury punktu rosy na poszczególnych urządzeniach. Wykrycie zawilgocenia belki chłodzącej powoduje zamknięcie zaworu wody lodowej. Wprowadzono także blokadę jednoczesnego grzania i chłodzenia oraz blokadę pracy klimakonwektorów i belek chłodzących w przypadku otwarcia okna w pomieszczeniu.

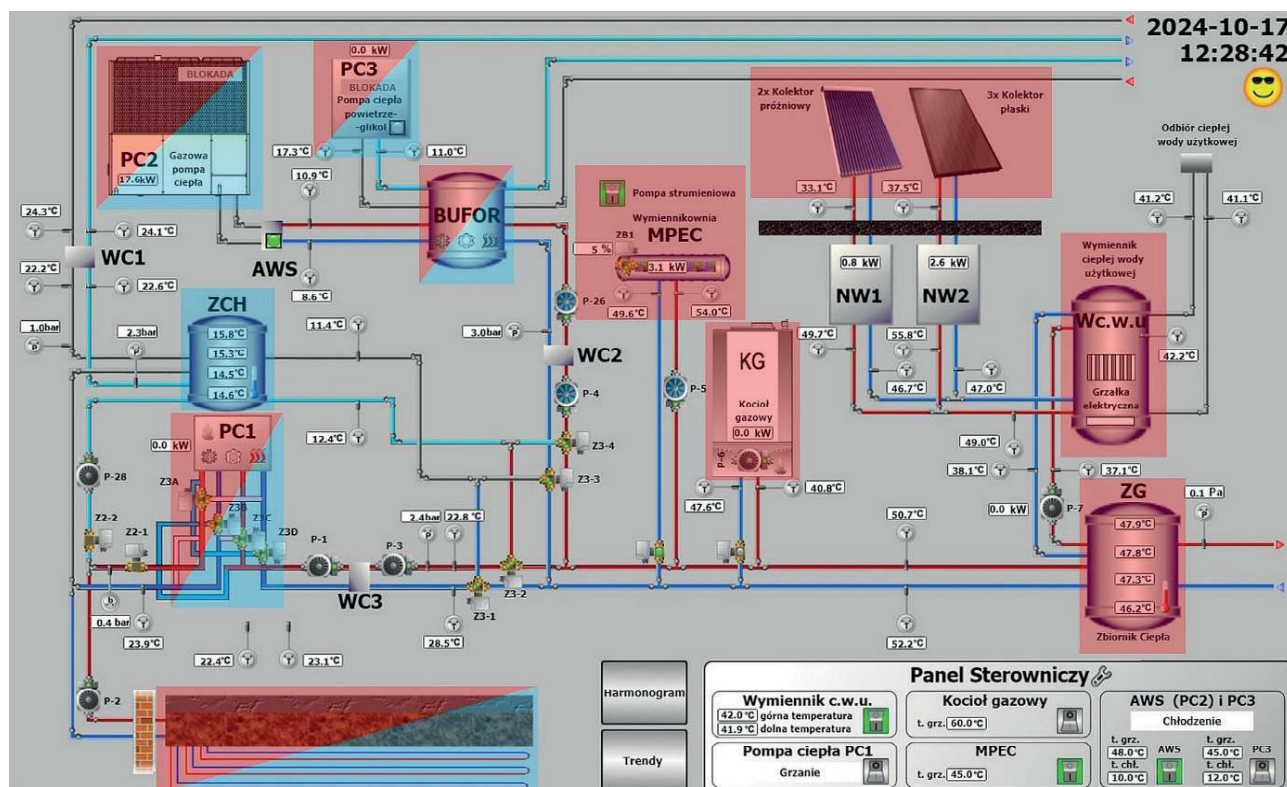
Ciepła woda użytkowa

Zasobnik ciepłej wody użytkowej (CWU) o pojemności 750 litrów jest ładowany zgodnie z zapotrzebowaniem według następującego priorytetu wykorzystania źródeł ciepła:

- dwa zespoły kolektorów słonecznych wykonanych w technologiach płaskiej i próżniowej,
- zasobnik ciepła budynku,
- grzałka elektryczna (wykorzystywana głównie w końcowej fazie okresowego przegrzewu).

W okresach, gdy budynek nie jest użytkowany, nastawy systemu CWU są modyfikowane zgodnie z harmonogramem, co obejmuje ładowanie wyłącznie z kolektorów słonecznych oraz ograniczenie cyrkulacji wody w obiegu. W przypadku nadprodukcji energii z kolektorów istnieje możliwość zrzutu nadwyżki do zasobnika ciepła.

Schemat technologiczny instalacji źródeł ciepła, chłodu i magazynów energii cieplnej przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Instalacja technologiczna źródeł i magazynów ciepła w budynku MLBE

Wentylacja

W budynku MLBE zaprojektowano trzy systemy nawiewno-wywiewne obsługiwane przez następujące niezależne centrale wentylacyjne.

- CW1 obsługuje parter, I i II piętro; wyposażenie: układ dwóch gruntowych wymienników ciepła do wstępnego przygotowania parametrów nawiewanego powietrza, wymiennik obrotowy o sprawności 80%, nagrzewnica, chłodnica;
- CW2 obsługuje ciągi komunikacyjne i sanitariaty; wyposażenie: wymiennik krzyżowy o sprawności 78,5%, nagrzewnica;
- CW3 obsługuje III i IV piętro; wyposażenie: wymiennik obrotowy o sprawności 84%, nagrzewnica, chłodnica.

Elementy centrali (wymiennik ciepła, nagrzewnica, chłodnica) współpracują ze sobą w celu stabilizacji temperatury zadanej (nawiewu lub wywiewu) przy minimalnym zużyciu energii. Wymienniki

ciepła umożliwiają odzysk ciepła zimą i chłodu latem, wykorzystując energię z powietrza zużytego. Dodatkowo centrala CW1 współpracuje z zespołem dwóch poziomych gruntowych wymienników ciepła GPWC (jeden ułożony bezpośrednio pod budynkiem, drugi poza obrysem budynku), które zapewniają wstępne przygotowanie powietrza przed jego dalszą obróbką w centrali. W ramach prowadzonych badań system wyposażono w automatyczny bypass (obejście), który kieruje powietrze zewnętrzne bezpośrednio do centrali w sytuacjach, gdy korzystanie z wymienników jest energetycznie nieopłacalne (Romańska-Zapała et al. 2019b; 2020).

W systemach obsługiwanych przez CW1 i CW3, na poziomie poszczególnych pomieszczeń lub stref budynku, w sposób ciągły mierzone są parametry powietrza wentylacyjnego, takie jak przepływ, temperatura, wilgotność względna i stężenie CO₂.

Centrale CW1 i CW2 działają zgodnie z harmonogramem funkcjonowania obiektu z odpowiednią korektą strumieni powietrza nawiewanego

i wywiewanego oraz temperatury zadanej. System obsługiwany przez CW1 wyposażono także w przepustnice z siłownikami umożliwiające regulację przepływu do obsługiwanych stref i pomieszczeń. Z kolei centrala CW3 utrzymuje zadane ciśnienie w kanałach oraz dostarcza świeże powietrze o temperaturze zależnej od obciążenia cieplnego obsługiwanych pomieszczeń, z uwzględnieniem harmonogramów. W pomieszczeniach zastosowano regulatory zmiennego przepływu powietrza VAV, które dostosowują intensywność wentylacji według zajętości pomieszczenia, intensywności jego użytkowania, a także docelowej temperatury oczekiwanej w pomieszczeniu (Rys. 5). Centrale mogą realizować również funkcję swobodnego chłodzenia budynku (*free cooling*), wykorzystując niższą temperaturę zewnętrzną w godzinach nocnych. Użytkownicy mają także możliwość uchylenia okien, a stan ich otwarcia jest monitorowany przez kontaktrony. Wykrycie otwarcia okna może powodować wyłączenie wszystkich lub wybranych funkcjonalności związanych z komfortem termicznym i jakością powietrza.

Oświetlenie

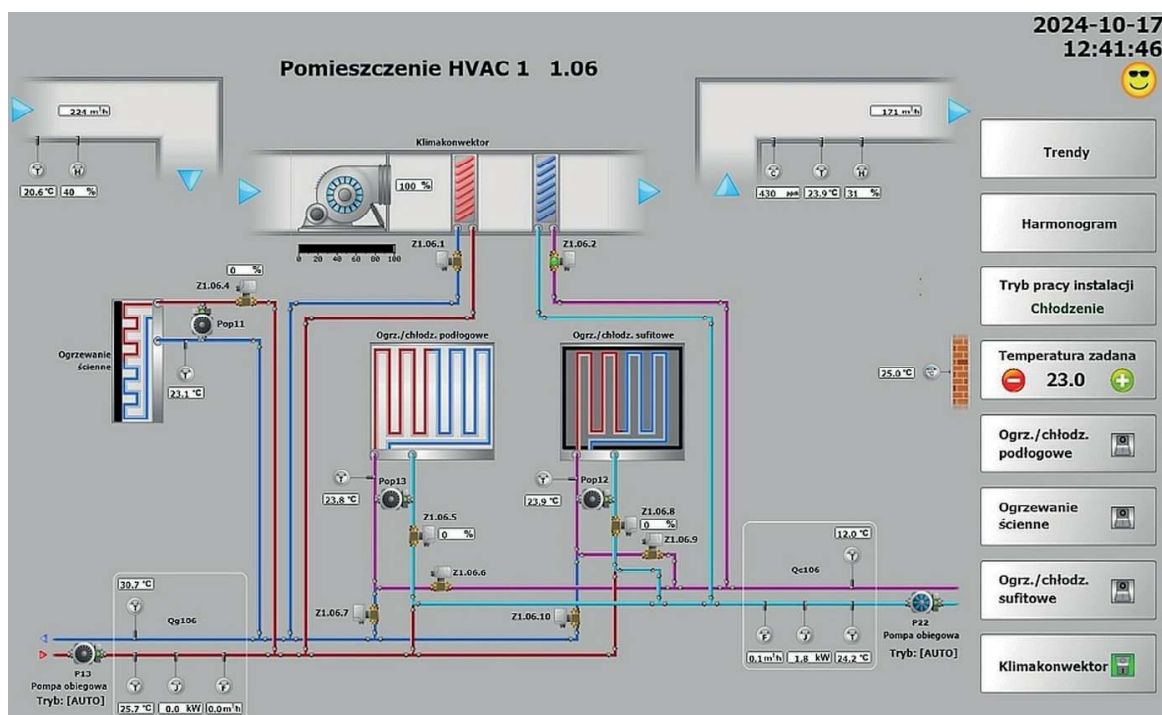
Oświetlenie wewnątrz zostało w całości zrealizowane z wykorzystaniem technologii LED, która charakteryzuje się szczególnie korzystnymi cechami w kontekście zastosowania w energooszczędnych systemach automatycznego sterowania oświetleniem. Sterowanie oświetleniem w ciągach komunikacyjnych polega na automatycznym włączaniu i wyłączaniu źródeł światła na podstawie wykrywania obecności użytkowników w poszczególnych strefach (strategia sterowania w skrócie nazywana sterowaniem od obecności). Pozostawiono także możliwość sterowania z lokalnych przycisków (Rys. 6).

Sterowanie oświetleniem w pomieszczeniach laboratoryjnych i biurowych jest również realizowane zgodnie z opisanym powyżej algorytmem, tylko z ręcznym włączaniem i automatycznym wyłączeniem po określonym czasie braku obecności

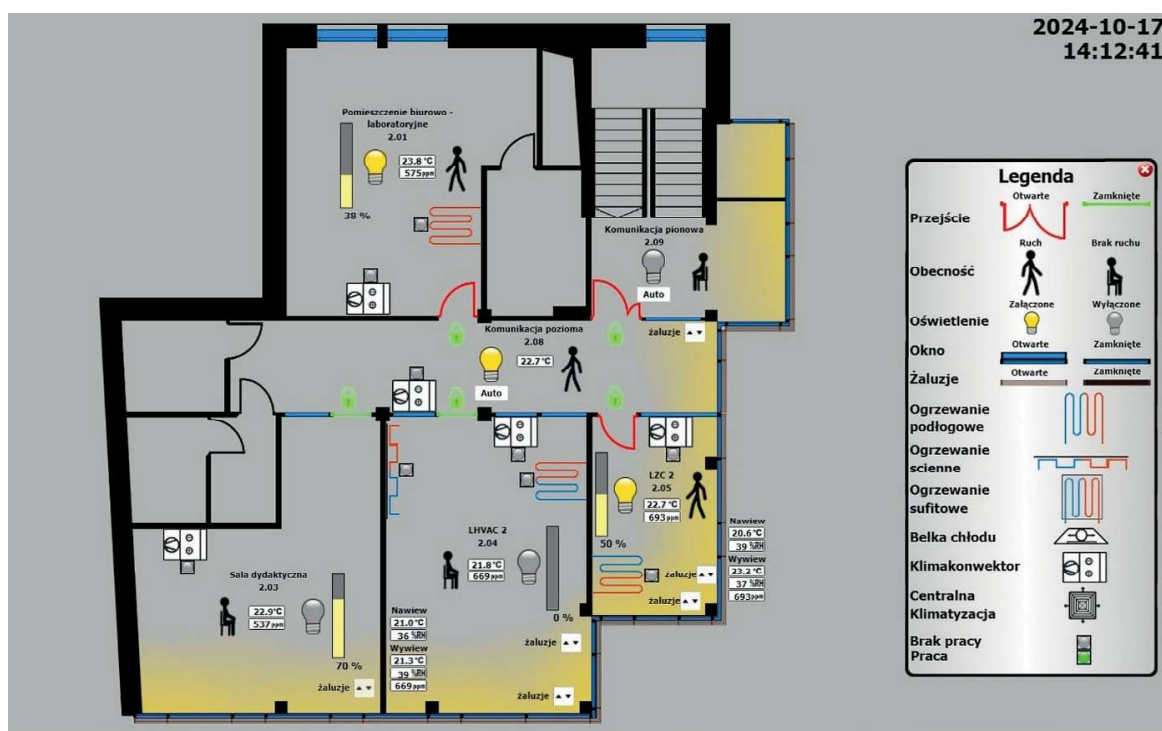
użytkowników w pomieszczeniu. W większości tych pomieszczeń zastosowano oświetlenie znacząco przewymiarowane, z możliwością zmiany natężenia oświetlenia, zapewniając użytkownikom możliwość dostosowania poziomu natężenia oświetlenia do rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego i własnych preferencji w szerokim zakresie. Ponadto w dwóch dużych salach na III i IV piętrze zastosowano oprawy oświetleniowe w systemie DALI. System pozwala nastawiać natężenie światła emitowanego indywidualnie przez każdą oprawę. Umożliwia to badanie zaawansowanych metod strategii sterowania oświetleniem (np. sterowanie rozkładem natężenia oświetlenia w pomieszczeniu w zależności od zapotrzebowania lub zapewnienie określonego poziomu natężenia oświetlenia wynikającego z sumy światła sztucznego – oprawy, i światła naturalnego – okna, naświetlacze itp.) (Dechnik 2021). Na zewnątrz obiektu zainstalowano oświetlenie terenu, które może być sterowane ręcznie, zgodnie z harmonogramem lub w zależności od dostępności światła dziennego.

Przesłony zacieniające

Budynek charakteryzuje się dużymi powierzchniami przeszkleń elewacji wschodniej i południowej. W związku z tym, w celu ochrony przed przegrzewaniem i oślepianiem, pomieszczenia na kondygnacjach II–IV osłonięto przesłonami zacieniającymi w formie poziomych żaluzji zewnętrznych. Ze względu na potrzeby badawcze świadomie zrezygnowano z tego typu ochrony kondygnacji I. Ponieważ piętra I i II charakteryzują się identycznym układem pomieszczeń, umożliwia to prowadzenie badań porównawczych zapotrzebowania na energię i komfort użytkownika przy różnych ustawieniach instalacji technicznych w zależności od uwarunkowań zewnętrznych. Podobny zamiar zrealizowano na III i IV piętrze, gdzie istnieje możliwość prowadzenia badań przy różnym sterowaniu przesłon zacieniających. Sterowanie przesłonami odbywa się ręcznie, ze wspomaganie napędem elektrycznym.



Rys. 5. Technologia sterowania klimatem w jednym z pomieszczeń MLBE



Rys. 6. Automatyczne sterowanie oświetleniem w zależności od obecności użytkownika

Inne instalacje

Na dachu i trzech elewacjach budynku zainstalowano stacje meteorologiczne, które dostarczają danych o lokalnych warunkach atmosferycznych. Zebrane

informacje są wykorzystywane do sterowania instalacjami budynku oraz jako dane wejściowe w prowadzonych badaniach naukowych. W budynku zamontowano także doświadczalną instalację fotowoltaiczną

niepodłączoną do sieci zasilającej budynku (tryb *off-grid*), która wykorzystuje panele stacjonarne na dachu budynku oraz żaluzje fotowoltaiczne stanowiące jedną z sekcji osłon zacieniających okna IV piętra. Kluczowe systemy budynku, w tym cały BBMS, są dodatkowo zabezpieczone przez system zasilania gwarantowanego.

Potencjał badawczy budynku

Przyjęte rozwiązania umożliwiają prowadzenie wszechstronnych prac badawczych w zakresie wpływu systemów sterowania i automatyzacji na efektywność energetyczną budynku oraz komfort jego użytkowników. Badania te obejmują również szczegółowe interdyscyplinarne zagadnienia, takie jak systemy osobistej kontroli środowiska (*personal environment control* – PEC), interakcje pomiędzy budynkiem a jego użytkownikami, akceptacja systemów sterowania oraz wpływ warunków mikroklimatycznych i metod sterowania komfortem na zdolności poznawcze człowieka (Dechnik 2017; 2021; Dudzik et al. 2019; Fedorczak-Cisak et al. 2019; Romańska-Zapała et al. 2019a, 2019c). Elastyczność i wielofunkcyjność instalacji technicznych budynku stwarza również pole do badań metodyki ewaluacji wskaźnika SRI.

Ewaluacja wskaźnika SRI dla budynku MLBE

Ewaluację wskaźnika gotowości budynku MLBE do inteligencji przeprowadzono w końcowej fazie realizacji pierwszego etapu projektu OTE. Obliczenie wskaźnika SRI przeprowadza się na podstawie szczegółowego **ustalenia właściwości i funkcjonalności** występujących w budynku instalacji technicznych, pod kątem indywidualnej gotowości do inteligencji każdej **usługi technicznej** z każdej instalacji. Gotowość danej funkcjonalności do inteligencji jest rozumiana jako zdolność tej funkcjonalności do współdziałania z innymi funkcjonalnościami oraz z czynnikami zewnętrznymi i użytkownikami. To współdziałanie polega na

możliwości wymiany informacji pomiędzy poszczególnymi elementami, które muszą współpracować ze sobą za pośrednictwem sieci transmisji danych.

W metodologii ewaluacji wskaźnika stosowane są następujące pojęcia:

- domeny – branżowe instalacje techniczne,
- usługi – określone funkcjonalności w ramach branżowych instalacji technicznych,
- poziomy funkcjonalności usług – konkretne sposoby sterowania daną usługą,
- kryteria wpływu (*impact criteria*) – kryteria oceny spełniania przez budynek wymagań określonych w EPBD 2018; nazywane są także czynnikami wpływu (*impact factors*) lub czynnikami oddziaływania.

Przy ewaluacji wskaźnika SRI mamy do czynienia z dwuetapową agregacją średnich ważonych. Na pierwszym etapie (tzw. agregacja pionowa) ustalamy oddziaływanie funkcjonalności (usług) instalacji technicznych (domen) na kryteria wpływu. Na drugim etapie (tzw. agregacja pozioma) ustalamy oddziaływanie poszczególnych kryteriów na wartość całkowitą wskaźnika SRI. Współczynniki wagowe stosowane w agregacji pionowej i agregacji poziomej mają istotny wpływ na wartość wskaźnika.

Praktyczne aspekty ewaluacji

W celu ewaluacji wskaźnika SRI budynku MLBE przeprowadzono wywiad z osobami odpowiedzialnymi za funkcjonowanie instalacji technicznych budynku z wykorzystaniem arkuszy audytowych SRI do ustalenia istniejących w budynku usług technicznych oraz poziomów ich funkcjonalności. Przeanalizowano także dokumentację techniczną systemów sterowania i automatyki instalacji technologicznych budynku oraz funkcjonalności systemu BBMS. Na podstawie zebranych danych przeprowadzono obliczenia za pomocą przeznaczonego do badań arkusza kalkulacyjnego SRI_v4.5. W ewaluacji nie uwzględniono doświadczalnych instalacji fotowoltaicznych budynku z powodu małych mocy tych instalacji w porównaniu

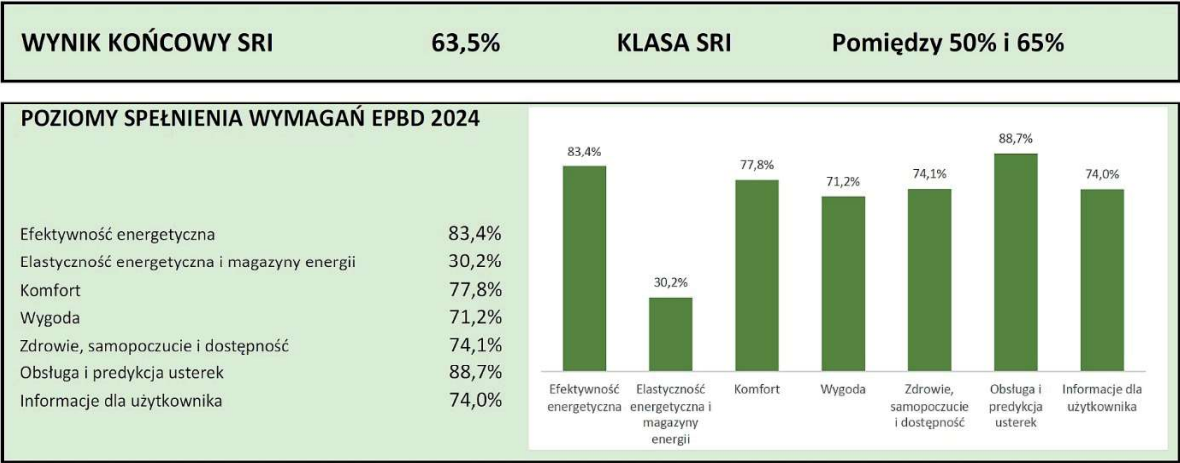
z zapotrzebowaniem budynku na moc, a także z powodu pracy instalacji fotowoltaicznych w trybie *off-grid*.

Wyniki ewaluacji

Poniżej przedstawiono wyniki ewaluacji – wynik końcowy oceny wartości wskaźnika SRI oraz wpływ poszczególnych kryteriów wpływu na ten wynik (Rys. 7). Ilustracje pochodzą z raportu generowanego przez doświadczalne narzędzie – arkusz kalkulacyjny SRI_v4.5 udostępniony przez DG ENER do realizacji

fazy testów metodyki ewaluacji wskaźnika SRI w państwach członkowskich Unii Europejskiej. W ramach realizacji projektu Obserwatorium Transformacji Energetycznej arkusz został wyposażony w polską wersję językową.

Wartości poszczególnych słupków wykresu ilustrują, w jakim stopniu dany budynek spełnia wymagania postawione współczesnym budynkom przez dyrektywę EPBD z roku 2018, potwierdzone w dyrektywie EPBD z 2024 r. W Tab. 1 przedstawiony jest wynik oceny spełniania tych wymagań przez budynek MLBE.



Rys. 7. Wynik ewaluacji gotowości do inteligencji budynku MLBE

Tab. 1. Stopień spełnienia przez budynek MLBE wymagań stawianych przez dyrektywy EPBD

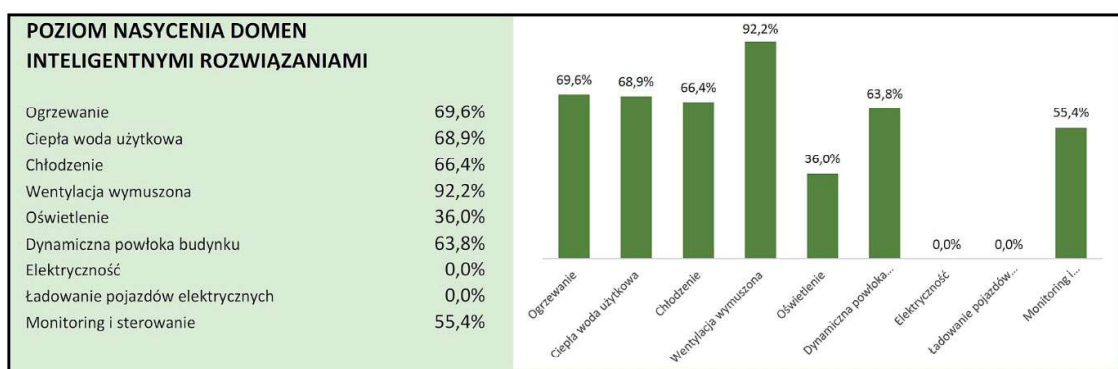
Poz.	Obszar	Kryterium wpływu	Oczekiwane właściwości budynku	Stopień spełnienia przez MLBE [%]	Stopień spełnienia w grupach kluczowych funkcjonalności [%]
1	BUDYNEK Działanie budynku	Efektywność energetyczna	Oszczędzanie wszelkich form energii i mediów w celu ograniczenia zapotrzebowania na energię i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych	84,4	86,0
2		Obsługa i predykcja usterek	Pewność działania instalacji technicznych i zapobieganie awariom przez prognozowanie wystąpienia uszkodzeń	88,7	
3	UŻYTKOWNIK Potrzeby użytkowników	Komfort	Zapewnienie komfortu według zapotrzebowania, w określonych granicach	77,8	74,3
4		Wygoda	Zapewnienie wygody użytkownika	71,2	
5		Zdrowie i samopoczucie	Zapewnienie dobrych warunków zdrowotnych i dobrego samopoczucia	74,1	
6		Informacje dla użytkownika	Informacje umożliwiające użytkownikowi podejmowanie świadomych decyzji dotyczących kosztów użytkowania i komfortu	74,0	
7	ZASILANIE Elastyczność	Elastyczność energetyczna i magazyny energii	Elastyczność i reaktywność w zakresie zasilania w energię, zdolność do magazynowania energii, zdolność generacji i dostarczania energii, zdolność ograniczania zużycia	30,2	30,2

Na kolejnej ilustracji (Rys. 8) przedstawiony jest wynik oceny poziomu udziału inteligentnych rozwiązań stosowanych w poszczególnych domenach, czyli gotowość do inteligencji instalacji technicznych budynku MLBE.

Na Rys. 9 przedstawiono wyniki szczegółowe ewaluacji, obrazujące wpływ poszczególnych domen na kolejne kryteria wpływu w budynku MLBE. Warto zauważyć, że w pewnych przypadkach poziom ten osiąga wartość 100%, co oznacza, że dana domena posiada najwyższą możliwą ocenę funkcjonalności, czyli jest maksymalnie nasycona inteligentnymi technologiami i w 100% spełnia wymagania stawiane przez EPBD. Tak jest np. w przypadku wpływu domeny **dynamiczna powłoka budynku** na kryterium **efektywność energetyczna**, domen **ogrzewanie**, **chłodzenie** i **wentylacja** na kryteria **obsługa i predykcja usterek** oraz **informacje dla użytkownika**, a także domeny **monitoring** i **sterowanie** na kryteria **komfort** oraz **zdrowie, samopoczucie i dostępność**. Na podstawie wyników szczegółowych przedstawionych na Rys. 9 można sformułować szereg wniosków dotyczących możliwości polepszenia wartości

wskaźnika SRI. Na przykład domena **oświetlenie** tylko w 50% wpływa na kryterium **efektywność energetyczna**, ponieważ w budynku nie zastosowano sterowania oświetleniem w zależności od natężenia światła dziennego. Na Rys. 10 przedstawiono wyniki oceny poziomu gotowości do inteligencji poszczególnych kluczowych obszarów funkcjonalności budynku: **budynek**, **użytkownik** i **zasilanie**. Funkcjonalności te są szczegółowo omówione w Tab. 1.

Właściwości budynku doskonale ilustruje opracowana przez jednego z autorów artykułu (PK) w ramach projektu OTE syntetyczna charakterystyka instalacji technicznych, na której można zobaczyć poziomy funkcjonalności wszystkich usług występujących w budynku (Rys. 11). Kolor zielony oznacza najwyższy poziom funkcjonalności usługi. Należy zaznaczyć, że domeny, które nie występują w budynku (w tym przypadku **elektryczność** oraz **ładowanie pojazdów elektrycznych**), nie są obowiązkowe i nie mają wpływu na wartość finalnej wartości wskaźnika SRI. Na syntetycznej charakterystyce właściwości budynku łatwo identyfikujemy usługi, których poziom funkcjonalności może być podniesiony.



Rys. 8. Poziom udziału inteligentnych rozwiązań w poszczególnych instalacjach technicznych budynku

WYNIKI SZCZEGÓŁOWE	ODDZIAŁYWANIE DOMEN NA POSZCZEGÓLNE WYMAGANE WŁAŚCIWOŚCI BUDYNKU						
	Efektywność energetyczna	Elastyczność energetyczna i magazyny energii	Komfort	Wygoda	Zdrowie, samopoczucie i dostępność	Obsługa i predykcja usterek	Informacje dla użytkownika
Ogrzewanie	90,5%	27,3%	83,3%	81,8%	80,0%	100,0%	100,0%
Ciepła woda użytkowa	90,9%	63,6%	0,0%	85,7%	0,0%	50,0%	66,7%
Chłodzenie	88,9%	27,3%	71,4%	71,4%	66,7%	100,0%	100,0%
Wentylacja wymuszona	77,1%	0,0%	95,0%	93,8%	94,4%	100,0%	100,0%
Oświetlenie	50,0%	0,0%	40,0%	40,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Dynamiczna powłoka budynku	100,0%	0,0%	60,0%	66,7%	50,0%	50,0%	33,3%
Elektryczność	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ładowanie pojazdów elektrycznych	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Monitoring i sterowanie	62,5%	11,1%	100,0%	64,7%	100,0%	81,8%	66,7%

Rys. 9. Wyniki szczegółowe oddziaływania domen na wymagane właściwości budynku

WYNIKI ZAGREGOWANE			
Kluczowe funkcjonalności 1 - Budynek	86,0%		
Kluczowe funkcjonalności 2 - Użytkownik	74,3%		
Kluczowe funkcjonalności 3 - Zasilanie	30,2%		

Rys. 10. Wyniki zagregowane przedstawiające oceny kluczowych funkcjonalności w trzech obszarach: budynek, użytkownik i zasilanie

Budynek MLBE								
Ogrzewanie	CWU	Chłodzenie	Wentylacja	Oświetlenie	DPB	Elektryczność	Ładow. EV	BMS
Lokalne sterowanie emisją ciepła w pomieszczeniach	Ładowanie zasob. Grzałki elektrycz. Pompy ciepła	Lokalne sterow. emisją chłodu w pomieszczeniach	Lokalne sterowanie przepływem powietrza w pom.	Sterowanie włącz/wyłącz od zajętości	Oslony przeciwsłoneczne	Lokalne wytwarzanie energii elektrycz.	Pojemność - ile stacji ładowania	Zarządzanie czasem pracy HVAC
Emisja ciepła przez TABS	Ładowanie zasobników wodą grzewczą	Emisja chłodu przez TABS	Sterowanie przepł. pow. na poziomie centrali	Jw. + sterowanie poziomem natężenia ośw.	Otwieranie/zamykanie okien	Lokalne magazynowanie energii elektrycz.	Bilansowanie ładowania z siecią zasilającą	Wykrywanie usterek i diagnostyka
Lokalne sterowanie temperaturą medium grzewczego	Ładowanie zasobników: kolektory słoneczne, inne	Lokalne sterow. temp. medium	Zapobieganie przegrzewowi przy odzysku ciepła		Informacje dla użytkownika	Optymalizacja autokonsumpcji własnej en. elektr.	Informacje dla użytkownika	Lokalne sterowanie emisją energii zależne od zajętości
Sterowanie pompami dystrybuc. medium grzewczego	Sekwencjonow. źródeł ciepła	Sterow. pompami dystrybucyjnymi wody lodowej	Ster. temperaturą nawiewu na poziomie centrali			Zintegrowane instalacje CHP		Raportowanie wydajności TBS i zużycia energii
Magazyn TES energii cieplnej wody grzewczej	Informacje dla użytkownika	Blokada równoc. grzania i chłodz. w pomieszczeniu	Chłodzenie bierne (Free Cooling)			Zastosowanie Demand-Side Management		Integracja z inteligentnymi sieciami zasilającymi
Sterowanie źródłem ciepła (bez pomp ciepła)		Magazyn wody lodowej	Informacje dla użytkownika			Raportowanie dot. lokalnych mag. ener. elektr.		Raportowanie efektywności działania DSM
Sterowanie pompami ciepła		Sterowanie źródłami chłodu				Raportowanie zużycia en. elektr.		Możliwość wyłączania działania DSM
Sekwencjonowanie źródeł ciepła		Sekwencjonow. źródeł chłodu						Platforma informat. do TBM
Informacje dla użytkownika		Informacje dla użytkownika						
Elastyczność i współdziałanie z el. siecią zasilającą		Elastyczność i współdziałanie z el. siecią zasil.						
Poziom funkcjonalności usługi Brak domeny Brak usługi 0 1 2 3 4								

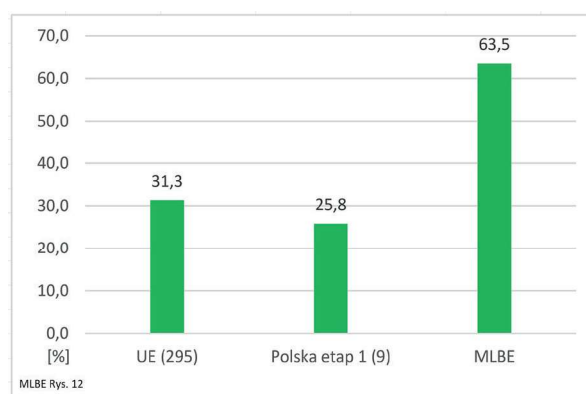
Rys. 11. Syntetyczna charakterystyka poziomów funkcjonalności instalacji technicznych budynku MLBE

Prezentacja graficzna wyników dla budynku MLBE

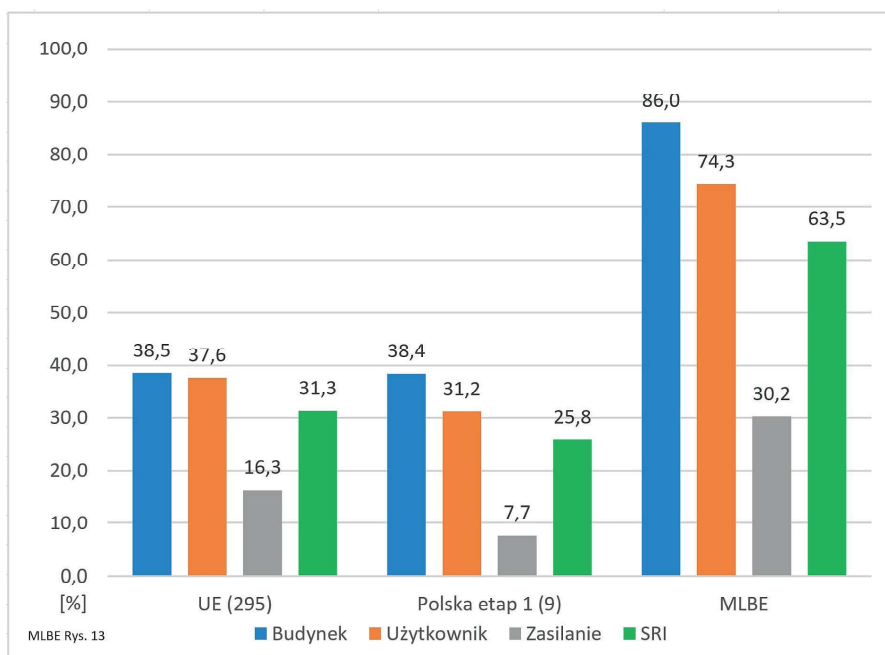
Na kolejnych ilustracjach przedstawiono porównanie wyników ewaluacji wskaźnika SRI oraz wartości jego składników dla kluczowych obszarów funkcjonalności budynków (**budynek** – efektywność energetyczna i pewność działania; **użytkownik** – komfort, wygoda, warunki zdrowotne, informacje dla użytkownika; **zasilanie** – zdolność do współpracy z inteligentną siecią zasilającą, generowanie i magazynowanie energii oraz zdolność do ograniczania zapotrzebowania) z wynikami średnimi z pierwszego etapu fazy testów metodyki ewaluacji wskaźnika SRI w Polsce oraz w całej Unii Europejskiej.

W przypadku UE wartości średnie obliczono na podstawie danych z 295 budynków, a w przypadku Polski w pierwszej fazie testów metodyki ewaluacji SRI ocenie poddano 9 budynków. Na Rys. 12 przedstawiono

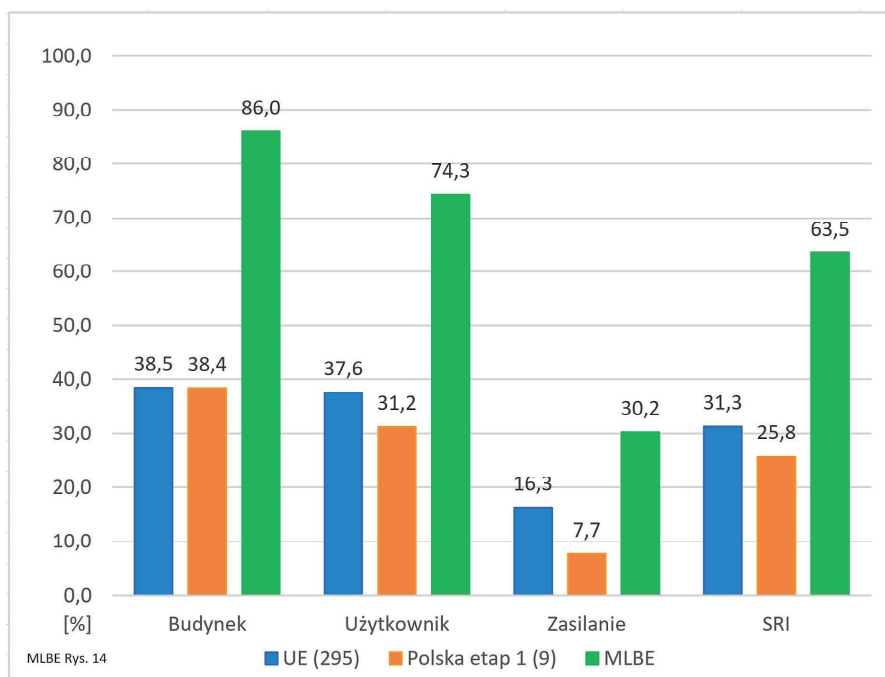
porównanie całkowitej wartości wskaźnika SRI dla poszczególnych lokalizacji (UE, Polska, MLBE), na Rys. 13 widoczne jest porównanie kluczowych składników SRI w poszczególnych lokalizacjach, a na Rys. 14 zilustrowano porównanie wyników tego samego wskaźnika zgrupowanych dla wszystkich lokalizacji.



Rys. 12. Porównanie średnich wartości wskaźnika SRI uzyskanych w testach metodyki w UE i w Polsce



Rys. 13. Porównanie wartości kluczowych składników SRI w grupach lokalizacja/składniki



Rys. 14. Porównanie wartości kluczowych składników SRI w grupach składnik/lokalizacje

Uwagi końcowe

Swój wysoki wynik SRI budynek MLBE zawdzięcza dwóm czynnikom: pełnej gamie usług w każdej zastosowanej domenie (instalacji branżowej) oraz bardzo wysokim poziomom funkcjonalności tych usług.

Większość usług jest na najwyższym, czwartym poziomie, co oznacza, że realizują one lokalne sterowanie emisją energii w zależności od zapotrzebowania na nią. Gwarantuje to wysoką efektywność energetyczną, dużą pewność działania instalacji technicznych budynku oraz wysoki poziom zaspokojenia

potrzeb użytkowników. Praktycznie rzecz biorąc, usługami, które nie posiadają najwyższego poziomu funkcjonalności i przez to obniżają wartość SRI, są te dotyczące elastyczności i współdziałania z energetyczną siecią zasilającą. Brak ten nie wynika z możliwości systemów sterowania i automatyki stosowanych w budynku, ale z właściwości zewnętrznej sieci zasilającej, która nie jest siecią inteligentną. Niestety funkcjonalności *smart grid* nie są aktualnie dostępne w energetycznych sieciach zasilających. Drugim czynnikiem wpływającym na obniżenie wartości wskaźnika SRI są niskie poziomy funkcjonalności usług związanych z domeną **dynamiczna powłoka budynku**, a trzecim – prawie całkowity brak funkcjonalności sterowania oświetleniem w zależności od poziomu natężenia światła naturalnego. Dwa pomieszczenia, w których zastosowano sterowanie DALI, w skali całego budynku nie wpływają wystarczająco silnie na wartość końcową wskaźnika SRI. Z charakterystyki ładowania można odczytać obszary wyposażenia technicznego budynku, które po ewentualnej modernizacji polepszą wartość wskaźnika. Należy jednak pamiętać, że nie chodzi o liczbę, ale o lepsze spełnianie przez budynek wymagań stawianych budynkom przez dyrektywy EPBD 2018 i EPBD 2024.

Uzyskany rezultat SRI wynika z opisanych w artykule rozwiązań instalacji technicznych oraz funkcjonalności badawczego systemu BMS. Warto podkreślić, że dzięki zastosowaniu wielu wariantów instalacji technicznych oraz elastycznego systemu BBMS, budynek stanowi doskonały obiekt do badań wpływu różnych instalacji technicznych i sposobów ich sterowania zarówno na efektywność energetyczną, jak i na wartość wskaźnika SRI. Stosunkowo niewielkim nakładem pracy, ograniczającym się często do modyfikacji lub implementacji odpowiednich algorytmów sterowania, może być realizowanych wiele wariantów badań. Co interesujące, poziomy funkcjonalności usług są także czasowo celowo obniżane, aby mogły stanowić punkt odniesienia do testowania nowych, innowacyjnych algorytmów sterowania. Bogate opomiarowanie budynku pozwala na rejestrację podczas eksperymentów badawczych

bardzo wielu danych, które są przedmiotem dalszych analiz i wniosków.

W ramach przyszłych działań rozwojowych infrastruktury MLBE planowane jest wyposażenie budynku w magazyn energii elektrycznej zintegrowany z instalacją fotowoltaiczną, a także stację ładowania pojazdów elektrycznych z dwukierunkową wymianą energii między pojazdem a budynkiem. Przyczyni się to do poprawy oceny budynku w domenach **elektryczność** oraz **ładowanie pojazdów elektrycznych**. Ponadto, już na etapie budowy obiektu przygotowano instalacje pod montaż wewnętrznych żaluzji oraz siłowników okiennych w celu realizacji automatycznego naturalnego przewietrzania. Wdrożenie funkcjonalności, na które pozwolą te urządzenia, wpłynie na polepszenie oceny w domenie **dynamiczna powłoka budynku**.

Wnioski

Wynik ewaluacji wskaźnika SRI dla budynku MLBE potwierdza tezę postawioną w tytule artykułu. Autorzy koncepcji budynku, jego wielowariantowych instalacji technicznych oraz systemów sterowania i automatyki, wykazali się perspektywicznym spojrzeniem na funkcjonalności budynków przyszłości. Potwierdza to porównanie założeń postawionych w latach 2012–2013 przez inicjatorów idei budowy MLBE i zastosowanych w nim rozwiązań ze zbieżnymi zaleceniami dotyczącymi właściwości budynków zdefiniowanymi w dyrektywie EPBD dopiero w 2018 r. Dowodzą tego również wyniki ewaluacji wskaźnika SRI, które stawiają budynek w czołówce najwyżżej ocenianych obiektów w fazie testów metodologii ewaluacji w skali europejskiej.

Wyniki realizacji projektu MLBE były szeroko propagowane i przyczyniały się do tego, że obecnie przywiązuje się większą wagę do funkcjonalności instalacji technicznych i ich sposobów sterowania. Zarówno koncepcja budowy MLBE, jak i późniejsza działalność tej instytucji, miały wpływ na rozpowszechnienie w środowiskach architektów, projektantów instalacji technicznych, inwestorów i użytkowników wiedzy o znaczeniu i wpływie normy EN 15232 i jej nowej odsłony

EN-ISO 52120-1:2022 na efektywność energetyczną budynków (Dechnik et al. 2017; Furtak et al. 2013; Kwasnowski et Fedorcza-Cisak 2014; Kwasnowski et al. 2013a; 2013b; Romańska-Zapała 2019a). To właśnie ta norma była kamieniem węgielnym do zdefiniowania metodologii ewaluacji wskaźnika SRI.

Warto zauważyć, że pomimo upływu ponad 25 lat paradygmaty dotyczące systemów sterowania i automatyki instalacji technicznych inteligentnych budynków sformułowane przez jednego z autorów artykułu (PK) pod koniec XX w. nie tylko nie straciły znaczenia, ale zyskały potwierdzenie w postaci jasnych wymagań stawianych współczesnym budynkom przez najnowsze dyrektywy EPBD. Można powiedzieć, że opracowane zostały nawet narzędzia analityczne do oceny spełniania tych paradygmatów.

Praca wykonana w ramach projektu pt. Obserwatorium Transformacji Energetycznej jako instrument wspierania społeczno-gospodarczego rozwoju Polski (OTE) współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG.

Bibliografia:

- Dechnik M. (2021), *Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej, w kontekście adaptacji oświetlenia pomieszczeń w budynku biurowym poprzez personalizację warunków oświetlenia*, rozprawa doktorska, AGH w Krakowie.
- Dechnik M., Furtak M. (2017), *Inteligentne budynki dziś i jutro*, „Bulder” 21: 64–66.
- Dechnik M., Moskwa S. (2017), *Smart House – inteligentny budynek – idea przyszłości*, „Przegląd Elektrotechniczny” 93/9: 1–10.
- Dechnik M., Grzywocz K., Romańska-Zapała A. (2017), *Współpraca centrali wentylacyjnej z regulatorami zmiennego przepływu powietrza VAV*, „Napędy i sterowanie” 19: 70–75.
- Dudzik M., Dechnik M., Furtak M. (2019), *Application of Neural Networks to Lighting Systems*, „MATEC Web of Conferences” 282: 1–6.
- Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the Energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on Energy efficiency, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj> [dostęp: 10.12.2024].
- Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Szmelter A., Dechnik M. (2019), *The Influence of Air Heating and Lighting on the Comfort Conditions in NZEB Buildings' Rooms*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 603: 1–12.
- Furtak M., Fedorcza-Cisak M., Kwasnowski P. (2013), *Małopolskie Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej – przykład możliwości badań „in situ”*, [w:] 1st World Multi-conference on Intelligent Building Technologies & Multimedia Management IBTMM 2013, Kraków: 97–102.
- Furtak M., Szydłowski R., Wójcik K. et al. (2014), *Dokumentacja powykonawcza: Budowa budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie wraz z urządzeniami budowlanymi i infrastrukturą techniczną*, Kraków.
- Hayduk G., Kwasnowski P. (2010), *Wprowadzenie do technologii LonWorks*, „Podręcznik INPE SEP”, Warszawa.
- Hayduk G., Kwasnowski P. (2011), *Technologia LonWorks*, [w:] M. Noga (red.), *AutBudNet: sieć certyfikowanych laboratoriów oceny efektywności energetycznej i automatyki budynków: standardy – laboratoria – certyfikacja: technologia LonWorks: PN-EN ISO/IEC 14908*, Kraków: 24–115.
- Kwasnowski P. (2002), *Otwartość w systemach automatyki budynków*, [w:] *Materiały kongresu InBuS 2002. 2nd International Congress on Intelligent Building Systems. Systemy sterowania oraz zarządzania bezpieczeństwem i energią w nowoczesnych budynkach*, J. Mikulík (red.), Kraków: 89–93.
- Kwasnowski P. (2013), *Metodyka projektowania budynków: wpływ normy PN-EN 15232:2012 na metodykę projektowania budynków w celu uzyskania wysokiej efektywności energetycznej*, „Inteligentny Budynek” 5: 42–45.
- Kwasnowski P. (2024), *Polska w europejskiej fazie testów wskaźnika SRI. Pierwsze wyniki badań*, https://www.energetyka-rozproszona.pl/media/event_activity_presentations/Polska_w_europejskiej_fazie_test%C3%B3w_SRI_Pawe%C5%82_Kwasnowski_27_2paSLvV.pdf [dostęp: 10.12.2024].
- Kwasnowski P., Fedorcza-Cisak M. (2013a), *Metodyka projektowania budynków użyteczności publicznej w celu maksymalizacji efektywności energetycznej w świetle dyrektywy EPBD oraz normy PN-EN 15232*, streszczenie, [w:] IBTMM 2013: Intelligent Building Technologies & Multimedia Management, Kraków: 63.
- Kwasnowski P., Fedorcza-Cisak M. (2013b), *Wpływ zintegrowanych systemów automatyki na efektywność energetyczną budynków w świetle normy PN-EN 15232*, [w:] P. Klemm (red.), *Fizyka budowlana w teorii i praktyce*, Łódź: 53–58.
- Kwasnowski P., Fedorcza-Cisak M. (2014), *Projektowanie budynków o wysokiej sprawności energetycznej z uwzględnieniem systemów automatyzacji budynków*, „Materiały Budowlane: Technologie, Rynek, Wykonawstwo” 5: 113–114.
- Kwasnowski P., Hayduk G. (2011), *Otwarte zintegrowane systemy automatyki i bezpieczeństwa budynków naukowo-dydaktycznych na Kampusie 600-lecia Odnowienia Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie-Pychowicach*, „Inteligentny Budynek” 2: 35–39.
- PN-EN 15232:2012 – Energetyczne właściwości budynków. Wpływ automatyzacji, sterowania i inteligencji zarządzania budynkami, Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny.
- Romańska-Zapała A., Furtak M., Dechnik M., Grzywocz K. (2019a), *Multi-Source Cooling System Control in the MLBE building – A Pilot Experimental Study*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 603: 1–11.
- Romańska-Zapała A., Furtak M., Fedorcza-Cisak M., Dechnik M. (2019b), *Need for Automatic Bypass Control to Improve the Energy Efficiency of a Building Through the Cooperation of a Horizontal Ground Heat Exchanger with a Ventilation unit During Transitional Seasons: A Case Study*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 471: 1–10.
- Romańska-Zapała A., Furtak M., Fedorcza-Cisak M., Dechnik M. (2019c), *Possibilities of Energy Efficiency Experimental Research Using MLBE Building's Automation and Control System*, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 603: 1–8.

Romańska-Zapała A., Bomberg M., Dechnik M., Boomberg M. (2020), *On Preheating of the Outdoor Ventilation Air*, „Energies” 13 (1): 15.

Verbeke S., Aerts D., Reynders G., Ma Y., Waide P. (2020), *Final Report on the Technical Support to the Development of a Smart Readiness Indicator for Buildings*, European Commission, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f9e6d89d-fbb1-11ea-b44f-01aa75ed71a1> [dostęp: 10.12.2024].

The building of the Małopolska Laboratory of Energy-Efficient Construction of the Cracow University of Technology as an example of a perspective look at the functionality of buildings

Abstract: In 2014, the MLBE building was commissioned at the Cracow University of Technology. The building houses research laboratories for building technologies, but the building itself and technical installations are also the object and subject of research. Ten years later, an evaluation of the SRI value for the building was carried out as part of the OTE Project. The facility received the highest value of the index among all buildings tested in this phase of testing in Poland. Such a result confirms that the creators of the MLBE building idea have successfully predicted the directions of development of the functionality of buildings.

Keywords: MLBE PK, SRI, smart readiness indicator for buildings, smart building

Paweł Kwasnowski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
kwasn@agh.edu.pl



Mirosław Dechnik

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Małopolskie Laboratorium Budownictwa
Energoszczędnego
miroslaw.dechnik@pk.edu.pl



Małgorzata Fedorczak-Cisak

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Małopolskie Laboratorium Budownictwa
Energoszczędnego
malgorzata.fedorczak-cisak@pk.edu.pl

