

POŚREDNIE POMIARY ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SYSTEMACH AUTOMATYKI BUDYNKÓW

Grzegorz WRÓBEL, Zbigniew MIKOŚ, Marcin JACHIMSKI, Grzegorz HAYDUK, Paweł KWASNOWSKI

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
tel.: 12 617 28 83, e-mail: [wrobel, mikos, jachim, hayduk, kwasn]@agh.edu.pl

Streszczenie: Podstawą efektywnej gospodarki energetycznej w budynku są wiarygodne dane pomiarowe, które można wykorzystać do stworzenia praktycznych miar określających wydajność energetyczną. Archiwizowane pomiary parametrów energetycznych pozwalają na stworzenie raportów i trendów, które następnie po analizie umożliwiają znalezienie wszystkich elementów mających wpływ na chwilową charakterystykę energetyczną budynku. Pomiary zużycia energii mogą być wykonywane na kilka sposobów: bezpośrednio mierząc aktualnie pobieraną energię, porównawczo (np. ze stworzonymi wcześniej profilami zużycia energii) lub pośrednio wykorzystując informacje umożliwiający wyliczenie lub oszacowanie aktualnie pobieranej energii na podstawie danych o urządzeniach ją pobierających i informacji z innych systemów technologicznych lub z systemu automatyki budynku (BMS).

W artykule przedstawiono pośrednie metody pomiaru zużycia energii elektrycznej dla celów oświetleniowych, zasilania sprzętu biurowego i komputerowego, infrastruktury informatycznej oraz podgrzewania ciepłej wody użytkowej. Pokazane zostało wykorzystanie informacji (sygnałów) pochodzących z systemu automatyki budynku takich jak informacja o obecności, informacja o załączeniu i wyłączeniu poszczególnych urządzeń dla wyliczenia pobranej przez poszczególne podsystemy energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: pomiar zużycia energii, pomiary pośrednie, odczyt liczników, automatyka budynku, IoT.

1. WSTĘP

Efektywność energetyczna oznacza ilość energii niezbędnej do uzyskania określonego rezultatu. Zarówno na świecie jak i w Polsce podejmowane są działania, których efektem ma być poprawa efektywności energetycznej czyli osiągnięcie tych samych rezultatów przy mniejszym zużyciu energii. Jest to na tyle istotne zagadnienie, że stworzone zostały normy europejskie i światowe [1, 2], w których zostało one ujęte. Również w polskim prawodawstwie, oprócz przyjęcia norm międzynarodowych, powstała „Ustawa o efektywności energetycznej” [3].

Jednym z podstawowych czynników warunkujących energooszczędną eksploatację budynku jest możliwość pełnego monitoringu zużycia mediów energetycznych, w tym energii elektrycznej [4, 5]. Podstawą efektywnej gospodarki energetycznej w budynku są wiarygodne dane pomiarowe, które można wykorzystać do stworzenia praktycznych miar określających wydajność energetyczną [6, 7]. Regularnie i w długim okresie czasu wykonywane i archiwizowane pomiary parametrów energetycznych pozwalają na stworzenie raportów i trendów, które można

poddawać analizie prowadzącej do znalezienia wszystkich elementów mających wpływ na charakterystykę energetyczną budynku.

Możliwe jest wtedy grupowanie pomiarów według różnych kryteriów: obszarów budynków (np. pięter, pokoi pracowniczych, korytarzy itp.), rodzajów odbiorów energii (oświetlenie, sprzęt komputerowy, wentylacja i klimatyzacja), użytkowników pomieszczeń itd.

Polska Norma PN-EN 15193 określa, że zużycie energii elektrycznej dla oświetlenia można zmierzyć jedną z następujących metod [8]:

- liczniki energii na określonych obwodach oświetleniowych w rozdzielniach elektrycznych,
- lokalne mierniki mocy zintegrowane ze sterownikami oświetlenia w systemie zarządzania oświetleniem,
- system zarządzania oświetleniem, który może obliczać lokalnie zużyty energię i podawać tę informację systemowi zarządzania budynkiem (BMS),
- system zarządzania oświetleniem, który może obliczać zużyty energię i udostępniać tę informację w formie elektronicznej, np. w formie arkusza kalkulacyjnego,
- system zarządzania oświetleniem, który rejestruje upływ godzin, proporcjonalność (poziom ściemniania) i odnosi je do bazy wewnętrznych danych o zainstalowanym obciążeniu.

Te same zasady można zastosować również do pozostałych typów pomiarów (sprzęt biurowy, ciepła woda użytkowa itp.).

Podstawowym sposobem pozyskiwania danych o zużyciu energii jest pomiar bezpośredni w różnych punktach instalacji elektrycznej budynku. Konieczna jest odpowiednia liczba liczników energii w poszczególnych obwodach instalacji i ich późniejszy odczyt i rejestracja. Takie podejście gwarantuje największą dokładność pomiarów, ale często jest trudne i kosztowne w realizacji. Głównymi czynnikami wpływającymi na realizację pomiarów bezpośrednich są:

- konieczność instalacji dużej liczby liczników (podliczników),
- często brak możliwości opomiarowania poszczególnych pomieszczeń lub grup pomieszczeń ze względu na istniejącą strukturę instalacji elektrycznej,
- konieczność budowy infrastruktury informatycznej do zbierania danych; w budynkach wyposażonych

w system BMS odpowiednia infrastruktura często istnieje.

Pomiar pośredni możliwy jest przede wszystkim w budynkach wyposażonych w systemy BMS [9, 10], w których zbierane i archiwizowane są rozmaite dane dotyczące stanu poszczególnych pomieszczeń, instalacji technologicznych i otoczenia budynku: obecność w pomieszczeniu, załączenie/wyłączenie odbioru energii (najczęściej oświetlenia lub ogrzewania), temperatura, natężenie oświetlenia zewnętrznego, praca klimatyzacji, stan rolet itp. Sygnały te lub korelacja kilku sygnałów pozwala z pewnym prawdopodobieństwem określić okresy załączenia niektórych odbiorów. Przykładowo skorelowanie sygnału obecności w pomieszczeniu, godzin tej obecności oraz godzin wschodu i zachodu Słońca (w celu wyznaczenia pory dnia i nocy) pozwala wyliczyć z pewnym prawdopodobieństwem czas załączenia oświetlenia w pomieszczeniu. Znając moc odbiorów i okres ich załączenia można obliczyć zużycie energii.

Dokładność i wiarygodność pomiaru pośredniego zużycia energii zależy przede wszystkim od tego, jak dokładnie za pomocą dostępnych sygnałów można określić czas załączenia danego odbioru. Najlepsze wyniki dają sygnały potwierdzenia załączenia danego obwodu (np. potwierdzenia załączenia z przekaźników załączających). Przykładowo, znacznie trudniej i z mniejszą wiarygodnością można oszacować czas załączenia oświetlenia na podstawie sygnału obecności w pomieszczeniu. Uwzględnić należy godziny obecności (pora dnia czy nocy), pogodę mającą wpływ na natężenie oświetlenia zewnętrznego i konieczność doświetlania pomieszczenia w dzień, a także przyzwyczajenia użytkownika(ów) danego pomieszczenia i jego świadomość konieczności oszczędzania energii. W takich wypadkach osiągnięcie odpowiedniej dokładności pomiarów pośrednich wymaga długotrwałej obserwacji i posiadania danych z różnych czujników.

W dostępnej literaturze znaleźć można omówienie zagadnień związanych z różnego rodzaju metodami umożliwiającymi szacowanie zapotrzebowania energetycznego budynków niemieszkalnych, zarówno ze względu na zainstalowaną infrastrukturę technologiczną jak i wyposażenie IT lub biurowe [11]. Opisanie są procedury pomiarów zużycia energii z dostępnych źródeł (energia elektryczna, gaz, kogeneracja itp.) w budynkach niemieszkalnych (pod kątem różnych typów powierzchni oraz różnych grup urządzeń) w celu oceny jakości i porównywania budynków [12]. Znacząca ilość prac prowadzonych jest w kierunku określenia wpływu uwzględnienia obecności na zużycie energii przez podsystemy oświetlenia, ogrzewania, klimatyzacji i wentylacji oraz jak najdokładniejszej analizy zależności pomiędzy profilami energetycznymi budynków a aktywnością użytkowników [13, 14]. Brak jest natomiast prac zmierzających do użycia pośrednich pomiarów energii, zwłaszcza wykorzystujących możliwości istniejących lub projektowanych systemów BMS. W pojedynczych pracach przedstawione zostały ogólne założenia lub modele systemów wykorzystujących sterowanie budynkiem jako źródło danych o zużyciu energii [15].

W niniejszym artykule przedstawiono sposoby pośredniego szacowania zużycia energii wybranych odbiorów energii elektrycznej: oświetlenia, biurowego sprzętu komputerowego, infrastruktury teleinformatycznej oraz bojlerów do wytwarzania ciepłej wody użytkowej

w budynkach biurowych. Dla oświetlenia rozpatrzono oddzielnie pomieszczenia pracownicze i ogólnodostępne (klatki schodowe, korytarze) dla różnych scenariuszy sterowania oświetleniem.

2. METODY POMIARÓW ENERGII

Metody pomiaru zużycia energii można podzielić na trzy kategorie, a wybór w konkretnym zastosowaniu zależy od potrzebnego do uzyskania stopnia szczegółowości pozyskiwanych informacji:

1. Porównanie.

Metoda ta polega na porównaniu aktualnego zużycia ze zużyciem w okresie poprzednim. Informacja o zużyciu może pochodzić zarówno z fizycznego pomiaru realizowanego przez np. liczniki główne, albo z faktur za bieżący i poprzedni okres rozliczeniowy. Zwykle możliwa jest w tej metodzie ocena całościowa, która nie daje możliwości oceny poszczególnych działań podjętych w celu polepszenia parametrów energetycznych budynku, a jedynie globalny ich skutek. Dodatkowo w przypadku porównywania fizycznych (globalnych) pomiarów parametrami wpływającymi na to porównanie mogą być zmieniająca się pogoda czy zmiana sposobu użytkowania poszczególnych powierzchni.

2. Pomiar bezpośredni.

W metodzie tej wszystkie informacje pozyskiwane są za pomocą fizycznego pomiaru, a zatem nie ma konieczności wprowadzania żadnych założeń upraszczających, które powodują zmniejszenie dokładności. Pomiary licznikami głównymi (na doprowadzeniu) umożliwiają tak jak poprzednio jedynie globalną ocenę parametrów energetycznych. Zatem w celu podziału na poszczególne obszary, przestrzennie lub funkcjonalnie, konieczne jest zastosowanie opomiarowania przy pomocy podliczników. W zależności od wymaganego stopnia szczegółowości mogą to być np. liczniki realizujące pomiary dla poszczególnych pięter, dla konkretnych użytkowników, albo dla pomieszczeń o takiej samej charakterystyce.

3. Pomiar pośredni.

W wielu przypadkach zastosowanie metody porównania jest za mało dokładne, natomiast pomiar bezpośredni powoduje stosunkowo duże koszty opomiarowania lub trudności techniczne w instalacji dużej ilości liczników. W takim przypadku może być użyta metoda pośrednia, która umożliwia uzyskanie różnych miar po przyjęciu pewnych założeń, zwłaszcza jeśli wpływ przyjętych założeń na pozyskiwaną miarę nie jest zbyt duży. W przypadku urządzeń lub systemów sterowanych, dla których zbierane i archiwizowane są dane procesowe możliwe jest określenie zużycia energii przy pomocy innych parametrów np. czasu załączenia danego urządzenia i jego mocy.

3. METODY POŚREDNIE POMIARU ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Ze względów ekonomicznych w budynkach niemieszkalnych często rezygnuje się z instalacji urządzeń pomiarowych dla poszczególnych pomieszczeń. W celu oszacowania zużycia energii w takich przypadkach można zastosować metody pośrednie bazujące na identyfikacji

czasu załączenia odbiornika energii i znajomości jego mocy. Dokładność i wiarygodność pomiarów prowadzonych pośrednio zależy od możliwości monitorowania czasu załączenia urządzenia. W zależności od rodzaju odbioru, od którego zależy sposób szacowania czasu załączenia, można wyróżnić pośrednie metody pomiaru zużycia energii przez:

- oświetlenie,
- biurowy sprzęt komputerowy,
- serwery i sprzęt infrastruktury teleinformatycznej,
- bojlerzy do podgrzewania ciepłej wody użytkowej.

4. POMIAR POŚREDNI ZUŻYCIA ENERGII NA OŚWIETLENIE

Sposób oszacowania zużycia energii elektrycznej na oświetlenie zależy od możliwości określenia czasu załączenia oświetlenia. Można rozważyć następujące przypadki sterowania oświetleniem:

- pomieszczenia biurowe bez sterowania od obecności,
- pomieszczenia biurowe ze sterowaniem od obecności,
- pomieszczenia biurowe z lub bez sterowania na podstawie danych o rzeczywistym stanie załączenia oświetlenia,
- pomieszczenia ogólnodostępne bez sterowania od obecności,
- pomieszczenia ogólnodostępne ze sterowaniem od obecności,
- pomieszczenia ogólnodostępne z lub bez sterowania na podstawie danych o rzeczywistym stanie załączenia oświetlenia.

4.1. Pomieszczenia biurowe bez sterowania oświetleniem od obecności

W tym przypadku obliczenie rocznego zużycia energii na oświetlenie w pomieszczeniu jest możliwe na podstawie szacunków czasu przebywania w pomieszczeniu przy obniżonym natężeniu oświetlenia naturalnego. Rozważyć należy dwa przypadki:

- pomieszczenia z oknami, w których zachodzi konieczność okresowego załączenia oświetlenia w czasie przebywania,
- pomieszczenia bez okien, które muszą być oświetlane przez cały czas obecności osób.

W przypadku pomieszczeń przeszklonych (z oknami)

można wyliczyć minimalne zużycie energii zakładając, że oświetlenie jest załączone tylko między rozpoczęciem pracy a wschodem Słońca oraz między zachodem a zakończeniem pracy. Czas ten należy zwiększyć o 0,5 – 1 godziny ze względu na konieczność używania oświetlenia bezpośrednio po wschodzie i przed zachodem Słońca. Dodatkowo należy zwiększyć zużycie energii o około 10 % ze względu na konieczność doświetlania pomieszczenia w dzień w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych. W opisywanym przypadku minimalne roczne zużycie energii $E_{PB1zOmin}$ można wyrazić zależnością (1):

$$E_{PB1zOmin} = \sum_{i=1}^{12} \left(P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_{iZWsch} + T_{iZZach}) + k_{iAtm} \cdot P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_R - (T_{iZWsch} + T_{iZZach})) \right) \quad (1)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_{iZWsch} – średni dzienny czas załączenia oświetlenia przed wschodem Słońca w i-tym miesiącu, T_{iZZach} – średni dzienny czas załączenia

oświetlenia po zachodzie Słońca w i-tym miesiącu, T_R – dzienny czas pracy, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), k_{iAtm} – współczynnik korekcyjny uwzględniający konieczność doświetlenia pomieszczenia w dzień ze względu na niekorzystne warunki atmosferyczne w i-tym miesiącu, i – kolejny miesiąc

Średni dzienny czas załączenia oświetlenia przed wschodem (T_{iZWsch}) i po zachodzie (T_{iZZach}) Słońca oraz czas pracy (T_R) można wyliczyć z zależności (2), (3) i (4):

$$T_{iZWsch} = (t_{iWsch} - t_{R0}) + T_{kor} \quad (2)$$

$$T_{iZZach} = (t_{R1} - t_{iZach}) + T_{kor} \quad (3)$$

$$T_R = t_{R1} - t_{R0} \quad (4)$$

gdzie: t_{iWsch} – średnia godzina wschodu Słońca w i-tym miesiącu, t_{iZach} – średnia godzina zachodu Słońca w i-tym miesiącu, t_{R0} , t_{R1} – godzina rozpoczynania i kończenia pracy, T_{kor} – dodatkowy czas załączenia oświetlenia bezpośrednio po wschodzie i przed zachodem Słońca.

W przypadku zależności (2), (3) i (4):

- jeżeli czas $T_{iZWsch} < 0$ lub $T_{iZZach} < 0$, to odpowiedni czas należy przyjąć równy zero;
- jeżeli czas $(T_R - (T_{iZWsch} + T_{iZZach})) < 0$, to należy go przyjąć równy zero.

Dla pomieszczeń z oknami można wyznaczyć maksymalne roczne zużycie energii $E_{PB1zOmax}$, zakładając, że światło jest załączone przez cały czas pracy niezależnie od zewnętrznych warunków oświetleniowych (5):

$$E_{PB1zOmax} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_R \quad (5)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_R – dzienny czas pracy, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc

Rzeczywiste zużycie zawierać się będzie pomiędzy zużyciem minimalnym $E_{PB1zOmin}$ a maksymalnym $E_{PB1zOmax}$. Wprowadzając współczynnik odzwierciedlający zachowania prooszczędnościowe użytkowników k_O można zapisać zależność na rzeczywiste roczne zużycie energii E_{PB1zO} w pomieszczeniu (6).

$$E_{PB1zO} = (1 - k_O) (E_{PB1zOmax} - E_{PB1zOmin}) + E_{PB1zOmin} \quad (6)$$

Współczynnik zachowania prooszczędnościowego użytkowników należy do przedziału $[0, 1]$. Wartość 0 współczynnika oznacza użytkownika bez zachowań sprzyjających oszczędzaniu energii (np. wyłączenie oświetlenia przy opuszczaniu pomieszczenia); wartość 1 oznacza bardzo świadomego użytkownika pomieszczenia, który używa oświetlenia tylko w przypadkach koniecznych.

W przypadku pomieszczeń nieprzeszkolonych (bez okien) minimalne zużycie energii jest trudne do oszacowania, gdyż wymaga znajomości minimalnego czasu przebywania użytkownika w pomieszczeniu. Czas ten jest możliwy do wyznaczenia w oparciu o znajomość rodzaju pomieszczenia i charakter pracy użytkownika.

W opisywanym przypadku minimalne roczne zużycie energii $E_{PB1bOmin}$ można wyrazić zależnością (7):

$$E_{PB1bOmin} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_{Rmin} \quad (7)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_{Rmin} – średni minimalny dzienny czas przebywania w pomieszczeniu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i -tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc

Dla pomieszczeń bez okien można wyznaczyć maksymalne roczne zużycie energii $E_{PB1bOmax}$, zakładając, że światło jest załączone przez cały czas pracy (8):

$$E_{PB1bOmax} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_R \quad (8)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_R – średni dzienny czas pracy, n_{iR} – liczba dni roboczych w i -tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc

Wprowadzając współczynnik odzwierciedlający zachowania prooszczędnościowe użytkowników k_O można zapisać zależność na rzeczywiste zużycie energii E_{PB1bO} w pomieszczeniu (9).

$$E_{PB1bO} = (1 - k_O)(E_{PB1bOmax} - E_{PB1bOmin}) + E_{PB1bOmin} \quad (9)$$

4.2. Pomieszczenia biurowe ze sterowaniem oświetleniem od obecności

Automatyczne sterowanie oświetleniem w zależności od obecności powoduje załączenie oświetlenia w przypadku wykrycia obecności w pomieszczeniu, pod warunkiem załączenia światła wyłącznikiem przez użytkownika. W przypadku pozostawienia przez użytkownika załączonego oświetlenia po opuszczeniu pomieszczenia układ sterowania wyłącza światło po zadanych czasie opóźnienia.

W przypadku uzależnienia oświetlenia od obecności można rozpatrzeć dwa przypadki:

- pomieszczenie z oknami – obliczając minimalne zużycie przy założeniu, że światło jest załączone w godzinach porannych przed świtem i wieczornych po zmierzchu uwzględniając dane z czujników obecności w tym okresie. Zużycie maksymalne dla tego przypadku jest wyznaczone przy założeniu załączenia oświetlenia przez cały czas użytkowania pomieszczenia z uwzględnieniem danych z czujników obecności.
- pomieszczenie bez okien, dla którego wyznaczyć można rzeczywiste zużycie na podstawie danych z czujników obecności. Wyznaczanie w tym przypadku zużycia minimalnego i maksymalnego nie ma sensu, ponieważ w przypadku przebywania w pomieszczeniu oświetlenie musi być załączone niezależnie od warunków zewnętrznych.

W przypadku pomieszczeń z oknami można wyliczyć minimalne zużycie energii zakładając, że oświetlenie jest załączone tylko w przypadku obecności w pomieszczeniu w okresie między rozpoczęciem pracy a wschodem Słońca powiększonym o około 60 minut oraz w okresie między

zachodem a zakończeniem pracy powiększonym o około 60 minut.

Dodatkowo należy zwiększyć zużycie energii o około 10% ze względu na konieczność doświetlania pomieszczenia w dzień w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych. W opisywanym przypadku minimalne roczne zużycie energii $E_{PB2zOmin}$ można wyrazić zależnością (10):

$$E_{PB2zOmin} = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_{iZWschOb} + T_{iZZachOb}) + k_{iAtm} \cdot P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_R - (T_{iZWschOb} + T_{iZZachOb}))}{(T_R - (T_{iZWschOb} + T_{iZZachOb}))} \right) \quad (10)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, $T_{iZWschOb}$ – średni dzienny czas obecności w pomieszczeniu w okresie pomiędzy wschodem Słońca a godziną rozpoczęcia pracy w i -tym miesiącu, $T_{iZZachOb}$ – średni dzienny czas obecności w pomieszczeniu w okresie pomiędzy zachodem Słońca a godziną zakończenia pracy w i -tym miesiącu, T_R – średni dzienny czas pracy, n_{iR} – liczba dni roboczych w i -tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), k_{iAtm} – współczynnik korekcyjny uwzględniający konieczność doświetlenia pomieszczenia w dzień ze względu na niekorzystne warunki atmosferyczne, i – kolejny miesiąc

Czasy obecności w pomieszczeniu $T_{iZWschOb}$ i $T_{iZZachOb}$ należy sumować na podstawie danych o obecności w następujących przedziałach:

- dla $T_{iZWschOb}$: $[t_{R0}, t_{iWsch} + T_{kor}]$, gdy $t_{R0} < (t_{iWsch} + T_{kor})$, w przeciwnym razie $T_{iZWschOb}$ należy przyjąć zero,
- dla $T_{iZZachOb}$: $[t_{iZach} - T_{kor}, t_{R1}]$, gdy $t_{R1} > (t_{iZach} - T_{kor})$, w przeciwnym razie $T_{iZZachOb}$ należy przyjąć zero.

Znaczenie symboli jest następujące: t_{iWsch} – średnia godzina wschodu Słońca w i -tym miesiącu, t_{iZach} – średnia godzina zachodu Słońca w i -tym miesiącu, t_{R0} , t_{R1} – godzina rozpoczynania i kończenia pracy, T_{kor} – dodatkowy czas załączenia oświetlenia bezpośrednio po wschodzie i przed zachodem Słońca.

Dla pomieszczeń z oknami można wyznaczyć maksymalne roczne zużycie energii $E_{PB2zOmax}$, zakładając, że światło w pomieszczeniu jest załączone przez cały czas obecności w pomieszczeniu w godzinach pracy (11):

$$E_{PB2zOmax} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_{iZO} \quad (11)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_{iZO} – średni dzienny czas obecności w pomieszczeniu w i -tym miesiącu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i -tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc.

Rzeczywiste zużycie zawierać się będzie pomiędzy zużyciem minimalnym $E_{B2zOmin}$ a maksymalnym $E_{B2zOmax}$. Wprowadzając współczynnik odzwierciedlający zachowania prooszczędnościowe użytkowników k_O , można zapisać zależność na rzeczywiste roczne zużycie energii E_{B2zO} w pomieszczeniu (12).

$$E_{PB2zO} = (1 - k_O)(E_{PB2zOmax} - E_{PB2zOmin}) + E_{PB2zOmin} \quad (12)$$

Współczynnik zachowania prooszczędnościowego użytkowników należy do przedziału [0, 1]. Wartość 0 współczynnika oznacza użytkownika bez zachowań sprzyjających oszczędzaniu energii (np. wyłączenie oświetlenia przy opuszczaniu pomieszczenia); wartość 1 oznacza bardzo świadomego użytkownika pomieszczenia, który używa oświetlenia tylko w przypadkach koniecznych.

W przypadku pomieszczeń bez okien można wyliczyć zużycie energii elektrycznej na oświetlenie na podstawie czasu przebywania w pomieszczeniu bazując na danych z czujników obecności. W tym przypadku roczne zużycie energii E_{PB2bO} można wyrazić zależnością (13):

$$E_{PB2bO} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_{iZOb} \quad (13)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_{iZOb} – średni dzienny czas przebywania w pomieszczeniu w i-tym miesiącu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc

W tym przypadku zużycie energii elektrycznej na oświetlenie jest niezależne od zachowania i świadomości użytkownika.

4.3. Pomieszczenia biurowe z lub bez sterowania oświetleniem od obecności na podstawie danych o rzeczywistym stanie załączenia oświetlenia

Dostępność danych o rzeczywistym czasie załączenia oświetlenia umożliwia dokładny pomiar zużycia energii. W budynkach wyposażonych w systemy BMS dane o załączeniu poszczególnych obwodów są przeważnie dostępne.

Na podstawie danych o stanie załączenia można wyliczyć roczne zużycie energii elektrycznej na oświetlenie E_{PB3} można wyrazić zależnością (14):

$$E_{PB3} = \sum_{i=1}^{12} P_0 \cdot T_{iZal} \quad (14)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw oświetleniowych w pomieszczeniu, T_{iZal} – rzeczywisty czas załączenia oświetlenia w pomieszczeniu w i-tym miesiącu, i – kolejny miesiąc

Pośredni pomiar zużycia energii bazujący na danych o rzeczywistym załączeniu oświetlenia nie jest obarczony błędami wynikającymi z konieczności przyjmowania dodatkowych założeń np. dotyczących zachowania użytkowników pomieszczenia.

4.4. Pomieszczenia ogólnodostępne bez sterowania oświetleniem od obecności

W przypadku pomieszczeń ogólnodostępnych bez sterowania oświetleniem od obecności obliczenie rocznego zużycia energii na oświetlenie jest możliwe na podstawie czasów załączenia oświetlenia głównego i zmiernego. Rozważono dwa przypadki:

- pomieszczenia przeszklone, gdzie przyjmuje się, że: (1) oświetlenie główne jest załączone przed wschodem

Słońca i po zachodzie Słońca tylko w okresie użytkowania budynku (np. w godzinach pracy); (2) w nocy w okresie, w którym budynek nie jest użytkowany jest załączone oświetlenie nocne; (3) w pozostałej części doby oświetlenie jest wyłączone.

- pomieszczenia nieprzeszkłone, w których przyjmuje się, że: (1) oświetlenie główne jest załączone w czasie użytkowania budynku; (2) w pozostałej części doby jest załączone oświetlenie nocne.

W przypadku pomieszczeń ogólnodostępnych przeszklonych zużycie energii E_{PO1zO} do oświetlenia pomieszczenia można oszacować na podstawie zależności (15):

$$E_{PO1zO} = \sum_{i=1}^{12} \left(P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_{iZWsch} + T_{iZZach}) + k_{iAtm} \cdot P_0 \cdot n_{iR} \cdot (T_R - (T_{iZWsch} + T_{iZZach})) + P_1 \cdot n_{iR} \cdot (T_D - T_R) + P_1 \cdot (n_i - n_{iR}) \cdot T_D \right) \quad (15)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw do oświetlenia normalnego w pomieszczeniu, P_1 – łączna moc opraw do oświetlenia nocnego w pomieszczeniu, T_{iZWsch} – średni dzienny czas załączenia oświetlenia przed wschodem Słońca w i-tym miesiącu, T_{iZZach} – średni dzienny czas załączenia oświetlenia po zachodzie Słońca w i-tym miesiącu, T_R – dzienny czas pracy, T_D – czas trwania doby, n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), k_{iAtm} – współczynnik korekcyjny uwzględniający konieczność doświetlenia pomieszczenia w dzień ze względu na niekorzystne warunki atmosferyczne, i – kolejny miesiąc

Średni dzienny czas załączenia oświetlenia przed wschodem (T_{iZWsch}), po zachodzie (T_{iZZach}) Słońca i czas pracy można wyliczyć z zależności (16), (17) i (18):

$$T_{iZWsch} = (t_{iWsch} - t_{R0}) + T_{kor} \quad (16)$$

$$T_{iZZach} = (t_{R1} - t_{iZach}) + T_{kor} \quad (17)$$

$$T_R = t_{R1} - t_{R0} \quad (18)$$

gdzie: t_{iWsch} – średnia godzina wschodu Słońca w i-tym miesiącu, t_{iZach} – średnia godzina zachodu Słońca w i-tym miesiącu, t_{R0} , t_{R1} – godzina rozpoczynania i kończenia pracy, T_{kor} – dodatkowy czas załączenia oświetlenia bezpośrednio po wschodzie i przed zachodem Słońca.

W przypadku zależności (3.29) i (3.30):

- jeżeli czas $T_{iZWsch} < 0$ lub $T_{iZZach} < 0$, to odpowiedni czas należy przyjąć równy zero;
- jeżeli czas $(T_R - (T_{iZWsch} + T_{iZZach})) < 0$, to należy go przyjąć równy zero.

W przypadku pomieszczeń zamkniętych (nieprzeszkłonych) zużycie energii E_{PO1bO} do oświetlenia pomieszczenia można oszacować na podstawie zależności (19):

$$E_{PO1bO} = \sum_{i=1}^{12} \left(P_0 \cdot n_{iR} \cdot (t_{R1} - t_{R0} + T_{dod}) + P_1 \cdot n_{iR} \cdot (T_D - (t_{R1} - t_{R0} + T_{dod})) + P_1 \cdot (n_i - n_{iR}) \cdot T_D \right) \quad (19)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw do oświetlenia normalnego w pomieszczeniu, P_1 – łączna moc opraw do oświetlenia nocnego w pomieszczeniu, t_{R0} , t_{R1} – godzina rozpoczynania i kończenia pracy, T_{dod} – dodatkowy czas załączenia oświetlenia przed rozpoczęciem i po zakończeniu pracy, T_D – czas trwania doby, n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc

4.5. Pomieszczenia ogólnodostępne ze sterowaniem oświetleniem od obecności

W przypadku pomieszczeń ogólnodostępnych ze sterowaniem oświetleniem od obecności obliczenie rocznego zużycia energii na oświetlenie jest możliwe na podstawie czasów załączenia oświetlenia głównego i zmierzchowego. Rozważyć należy dwa przypadki:

- pomieszczenia przeszklone, w których z racji funkcji takich pomieszczeń (np. halle wejściowe) nie stosuje się sterowania oświetlenie w zależności od obecności, do obliczenia zużycia energii należy zastosować metody jak dla pomieszczeń ogólnodostępnych bez sterowania w zależności od obecności.
- pomieszczenia nieprzeszklone, w których przyjmuje się, że: (1) oświetlenie główne jest załączone w czasie obecności; (2) w pozostałej części doby jest załączone oświetlenie nocne.

W przypadku pomieszczeń ogólnodostępnych przeszklonych zużycie energii E_{PO2zO} do oświetlenia pomieszczenia można oszacować na podstawie zależności (20):

$$E_{PO2zO} = E_{PO1zO} \quad (20)$$

gdzie: E_{PO1zO} – zużycie energii w pomieszczeniach ogólnodostępnych przeszklonych bez sterowania oświetleniem od obecności (3.28).

W przypadku pomieszczeń ogólnodostępnych zamkniętych (nieprzeszklonych) zużycie energii E_{PO2bO} do oświetlenia pomieszczenia można oszacować na podstawie zależności (21):

$$E_{PO2bO} = \sum_{i=1}^{12} \left(P_0 \cdot n_{iR} \cdot T_{iObR} + P_1 \cdot n_{iR} \cdot (T_D - T_{iObR}) + P_0 \cdot (n_i - n_{iR}) \cdot T_{iObNR} + P_1 \cdot (n_i - n_{iR}) \cdot (T_D - T_{iObNR}) \right) \quad (21)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw do oświetlenia normalnego w pomieszczeniu, P_1 – łączna moc opraw do oświetlenia nocnego w pomieszczeniu, T_{iObR} – średni dzienny czas obecności w pomieszczeniu w dniu robocze, T_{iObNR} – średni dzienny czas obecności w pomieszczeniu w dniu nierobocze, T_D – czas trwania doby, n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu (można przyjąć średnio 24 dni), i – kolejny miesiąc.

4.6. Pomieszczenia ogólnodostępne z lub bez sterowania oświetleniem od obecności na podstawie danych o rzeczywistym stanie załączenia oświetlenia

Dostępność danych o rzeczywistym czasie załączenia oświetlenia umożliwia dokładny pomiar zużycia energii. W budynkach wyposażonych w systemy BMS dane

o załączeniu poszczególnych obwodów są przeważnie dostępne.

Na podstawie danych o stanie załączenia można wyliczyć roczne zużycie energii elektrycznej na oświetlenie w pomieszczeniu ogólnodostępnym E_{PO3} można wyrazić zależnością (22):

$$E_{PO3} = \sum_{i=1}^{12} (P_0 \cdot T_{iZal0} + P_1 \cdot T_{iZal1}) \quad (22)$$

gdzie: P_0 – łączna moc opraw do oświetlenia normalnego w pomieszczeniu, P_1 – łączna moc opraw do oświetlenia nocnego w pomieszczeniu, T_{iZal0} – rzeczywisty czas załączenia oświetlenia normalnego w pomieszczeniu w i-tym miesiącu, T_{iZal1} – rzeczywisty czas załączenia oświetlenia nocnego w pomieszczeniu w i-tym miesiącu, i – kolejny miesiąc

Pośredni pomiar zużycia energii bazujący na danych o rzeczywistym załączeniu oświetlenia nie jest obarczony błędami wynikającymi z konieczności przyjmowania dodatkowych założeń np. dotyczących zachowania użytkowników pomieszczenia.

5. POMIAR POŚREDNI ZUŻYCIA ENERGII PRZEZ BIUROWY SPRZĘT KOMPUTEROWY

Zużycie energii przez sprzęt komputerowy w pomieszczeniach biurowych E_{PC} można pośrednio obliczyć bazując na ilości komputerów pracowników, które są załączone w okresie pracy i ilości komputerów (serwerów) załączonych w sposób ciągły (23).

$$E_{PC} = \sum_{i=1}^{12} (n_{PC1} \cdot P_{PC1} \cdot n_{iR} \cdot T_R + n_{PC2} \cdot P_{PC2} \cdot n_i \cdot T_D) \quad (23)$$

gdzie: P_{PC1} , P_{PC2} – średnia moc jednego komputera pracownika i komputera pracującego w sposób ciągły, n_{PC1} , n_{PC2} – liczba komputerów pracowników i komputerów pracujących w sposób ciągły, n_{iR} – liczba dni roboczych w i-tym miesiącu, n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, T_R – dzienny czas pracy, T_D – czas trwania doby, i – kolejny miesiąc.

Jeżeli nie są znane rzeczywiste moce poszczególnych komputerów to można przyjąć w przybliżeniu dla stacjonarnego komputera PC z monitorem LCD moc 150 W, dla komputera przenośnego (notebooka) – 60 W, dla serwera – 200 W.

6. POMIAR POŚREDNI ZUŻYCIA ENERGII PRZEZ SERWERY I SPRZĘT INFRASTRUKTURY TELEINFORMATYCZNEJ

Zużycie energii przez serwery i sprzęt infrastruktury teleinformatycznej E_{IT} można pośrednio obliczyć bazując na liczbie zainstalowanych serwerów oraz liczbie innych urządzeń infrastruktury teleinformatycznej (przełączniki, routery itp) (24).

$$E_{IT} = \sum_{i=1}^{12} (n_{SRV} \cdot P_{SRV} + n_{RTR} \cdot P_{RTR}) \cdot n_i \cdot T_D \quad (24)$$

gdzie: P_{SRV} , P_{RTR} – średnia moc jednego serwera i jednego urządzenia pomocniczego (switcha, routera), n_{SRV} , n_{RTR} – liczba serwerów i urządzeń pomocniczych, n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, T_D – czas trwania doby, i – kolejny miesiąc.

Jeżeli nie są znane rzeczywiste moce poszczególnych komputerów to można przyjąć w przybliżeniu dla serwera moc 400 W, a dla pozostałego osprzętu – po 30 W.

7. POMIAR POŚREDNI ZUŻYCIA ENERGII NA PODGRZEWANIE CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

Zużycie energii na podgrzewanie wody użytkowej E_{CWU} można obliczyć pośrednio na podstawie zużycia wody, wymaganego przyrostu temperatury, sprawności bojlerów oraz konieczność utrzymania temperatury wody w godzinach nocnych mimo braku poboru (25). Ostatni czynnik (k_n) należy przyjąć doświadczalnie w granicach 1,1 – 1,5 zależnie od jakości izolacji bojlera

$$E_{CWU} = \sum_{i=1}^{12} n_i \cdot \frac{1}{\eta} \cdot k_n \cdot c_{H2O} \cdot \rho_{H2O} \cdot V_i \cdot \Delta T_i \quad (25)$$

gdzie: V_i – średnie dobowe zużycie ciepłej wody użytkowej w i-tym miesiącu, ΔT_i – średni przyrost temperatury wody w i-tym miesiącu, ρ_{H2O} – gęstość wody, c_{H2O} – ciepło właściwe wody, η – sprawność bojlera, k_n – współczynnik korekcyjny uwzględniający konieczność utrzymania temperatury wody w przypadku braku poboru (np. w godzinach nocnych), n_i – liczba dni w i-tym miesiącu, i – kolejny miesiąc.

8. WNIOSKI

Przedstawione pośrednie metody pomiaru zużycia energii elektrycznej dotyczą głównie dużych budynków, w których możliwość określenia energii zużywanej przez poszczególne podsystemy elektryczne, grupy pomieszczeń lub grupy urządzeń jest wyjątkowo istotna [15]. W przeciwnieństwie do pomiarów bezpośrednich, w przypadku których niezbędna jest instalacja dużej ilości indywidualnych liczników energii, co generuje znaczne koszty wynikające nie tylko z samego sprzętu ale również z powodu ich montażu, zwłaszcza jeżeli wykonywane jest to jako doposażenie istniejącej już instalacji, pomiary pośrednie nie będą generować kosztów sprzętowych, a tylko programowe w celu wykorzystania istniejących w systemie BMS informacji.

Realizacja pomiarów pośrednich możliwa będzie zatem w budynkach wyposażonych w systemy BMS, w których dostępne są informacje, zarówno aktualne jak i archiwalne, dotyczące stanu instalacji technologicznych, obecności, temperatury, stanu pracy urządzeń elektrycznych. Metoda pośrednia będzie oczywiście obciążona błędem, którego wielkość będzie wprawdzie zależna od wielu parametrów, ale możliwa do oszacowania. Przede wszystkim na dokładność i wiarygodność pomiaru pośredniego wpływ będzie miała możliwa do osiągnięcia dokładność sygnałów określających czas załączenia poszczególnych odbiorów i dokładność określenia ich mocy chwilowej.

Wypracowana w sposób teoretyczny metodyka i wynikający z niej sposób obliczania ilości zużytej energii w różnych przypadkach wymaga potwierdzenia doświadczalnego. Należy zrealizować instalację pomiarową

w budynku, lub przynajmniej jego części, wyposażonym w system BMS, przeznaczoną do pomiarów bezpośrednich. Na podstawie archiwizowanych danych dotyczących zarówno pomiarów energii przez licznik jak i wszystkich sygnałów z systemu automatyki budynku można będzie dla poszczególnych przypadków porównać dokładność i wiarygodność wyników pomiarów zużycia energii uzyskanych z wykorzystaniem opisanych metod pośrednich ze zużyciem energii uzyskanym metodami bezpośrednimi.

9. BIBLIOGRAFIA

1. 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, Official Journal L 114 of 27/04/2006 (ESD).
2. European Standard EN16001 „Energy management systems - Requirements with guidance for use”, lipiec 2009.
3. Ustawa o efektywności energetycznej z dnia 15 kwietnia 2011 r. Dziennik Ustaw Nr 94, Poz. 551.
4. Jachimski M., Mikoś Z., Wróbel G., Hayduk G., Kwasnowski P., Event-based and time-triggered energy consumption data acquisition in building automation, First international conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing : June 17–19, 2015, Krakow, Poland, IEEE Xplore Digital Library, cop. 2015. — e-ISBN: 978-1- 4673-7888- 8, 8 pages.
5. Jachimski M., Mikoś Z., Hayduk G., Event-based with linear prediction electricity meters reading in building automation, Second International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing : June 13–15, 2016, Krakow, Poland, IEEE Xplore Digital Library, cop. 2016, 8 pages.
6. Noga M., Jachimski M., Hayduk G., Mikoś Z., Ożadowicz A., Wróbel G., Grela J., Kwasnowski P., Projekt badawczy, Metodyka narzędzia do oceny poprawy efektywności energetycznej budynków użyteczności publicznej w wyniku zastosowania urządzeń i systemów automatyki budynków zgodnych z normą PN-EN ISO/IEC 14908, Grant NCN N N511 312240, KANiUP AGH, Kraków, 2011-2014.
7. Noga M., Jachimski M., Hayduk G., Mikoś Z., Ożadowicz A., Wróbel G., Grela J., Kwasnowski P., Projekt badawczy, Zoptymalizowanie zużycia energii elektrycznej w budynkach, Grant NCBiR SP/B/5/68017/10, KANiUP AGH, Kraków, 2010-2013.
8. Polska Norma PN-EN 15193, Charakterystyka energetyczna budynków. Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia, styczeń 2010.
9. Kwasnowski P.: Ocena wpływu systemów automatyki i zarządzania na efektywność energetyczną budynków w świetle normy PN-EN 15232:2012, 1st World multi-conference on Intelligent Building Technologies & Multimedia Management IBTMM, Kraków16–18.10.2013.
10. Noga M., Jachimski M., Hayduk G., Mikoś Z., Ożadowicz A., Strzałka J., Wróbel G., Grela J., Kwasnowski P., Strzałka-Goluszka K., Wpływ automatyki na efektywność energetyczną budynków:

poradnik dla projektantów, ISBN 978-83-933483-4-3, Kraków 2013.

11. Menezesa A.C., Crippsa A., Buswellb R.A., Wrightb J., Bouchlaghemc D.; Estimating the energy consumption and power demand of small power equipment in office buildings; *Energy and Buildings* 75 (2014), 199-209.
12. Barley D., Deru M., Pless S., Torcellini P.; Procedure for Measuring and Reporting Commercial Building Energy Performance; Technical Report NREL/TP-550-38601 October 2005.
13. Nguyen T.A., Aiello M.; Energy intelligent buildings based on user activity: a survey; *Energy Build.*, 56 (2013), pp. 244–257
14. Mehreen S. Gul, Sandhya Patidar; Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building; *Energy and Buildings* 87 (2015) 155-165.
15. Martirano L., Aliberti M., Massarella F., Metering of Energy Used for Lighting: a Practical Indirect Method; IEEE Electrical Power & Energy Conference, Halifax, Canada, 2010.

INDIRECT MEASUREMENTS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN BUILDING AUTOMATION SYSTEMS

Reliable measurement data that can be used to create practical measures defining energy efficiency is the basis for efficient energy management in building. Archived measurements of energy parameters allow to create reports and trends, which then enables the analysis of all elements which influence the energy performance of the building. Measurements of power consumption can be performed in several ways: directly measuring the currently available energy, comparatively (eg. with earlier created profiles of energy consumption), or indirectly calculating or estimating the current power consumption using the devices specifications and information from building technological systems or building management system (BMS).

The article presents the indirect method of measuring electricity consumption for lighting, office and computer equipment, IT infrastructure and hot water preparation (DHW). It shows the use of information (signals) coming from the building management system, such as information about the presence, information about individual devices switching on and off for calculation of current power consumption by the various subsystems of electricity.

Keywords: electricity consumption measurement, indirect measurement, meters reading, building automation, IoT.