

## Efektywność energetyczna instalacji oświetleniowych z układami sterowania

**Streszczenie.** W prezentowanym artykule przedstawiono zapisy norm i przepisów dotyczących instalacji oświetleniowych ze sterowaniem. Omówiono założenia projektów oświetlenia realizowanych w budynkach użyteczności publicznej. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów parametrów elektrycznych opraw fluorescencyjnych oraz LED. Zaprezentowano dane dotyczące energii elektrycznej w całej instalacji a także wyniki analiz dotyczących przepływów składowych energii elektrycznej (czynnej i biernej).

**Abstract.** The paper presents standards and regulations for lighting installations with control systems. It discusses the basic features of lighting installation projects in public buildings. The paper contains example results of measurements of the electrical parameters for fluorescent luminaires and LED. It presents data regarding energy efficiency in the entire system as well as results of analyzes regarding flows of active and reactive power components.. (Energy efficiency of lighting installations with control systems).

**Słowa kluczowe:** oświetlenie, układy sterowania, efektywność energetyczna.

**Keywords:** Lighting, Control systems, Energy efficiency.

### Wstęp

W eksploatowanych aktualnie instalacjach oświetleniowych pomieszczeń użyteczności publicznej a także przemysłowych stosowane są różne systemy sterowania mające zapewnić komfort użytkownika oraz efektywność energetyczną. Sterowanie oświetleniem jak wiadomo polega na ręcznym, półautomatycznym lub automatycznym ustawieniu różnych funkcji oświetlenia zależnie od wymagań użytkownika lub warunków zewnętrznych. Sterowanie oświetleniem może odbywać się na bardzo różnych poziomach - od ręcznego ustawienia wymaganego natężenia światła za pomocą ściemniaczy po pełną automatyzację uwzględniającą porę dnia, natężenie światła zewnętrznego, otwieranie i zamykanie drzwi oraz obecność użytkowników [1,2].

### Wymagania norm

Stosowane powszechnie systemy sterowania są projektowane i realizowane w oparciu o przepisy i normy przedmiotowe wyrobów [3-15]. Opisano w nich wymagania techniczne dotyczące poszczególnych systemów. Ponieważ nie pracują jako urządzenia samodzielne ich parametry powinny być dopasowane do urządzeń, z którymi współpracują czyli systemów oświetleniowych. Niestety nie ma przepisów nakazujących sprawdzanie parametrów całych systemów zainstalowanych w budynkach. O ile na przykład wymagania związane ze spełnieniem dyrektywy EMC [5] wiązałyby się z koniecznością przeprowadzania badań całych obiektów (koszt aparatury bardzo duży) to już badania dotyczące zużycia składowych energii systemów oświetleniowych ze sterowaniem powinny być elementem pomiarów odbiorczych instalacji.

Autorzy w przedmiotowej literaturze znaleźli niewiele przykładów takich zaleceń. Jednym z przykładów jest norma określająca dopuszczalne wartości zawartości harmonicznym w prądzie zasilającym  $\leq 16A$  [6]. W normie tej z grupy sprzęt oświetleniowy (klasa C sprzęt o mocy  $P > 25 W$  i klasa D o sprzęt o mocy  $P \leq 25 W$ ) wyodrębniono **ściemniacze do żarówek** i zaliczono do klasy A – odbiorniki ogólne. Porównując dopuszczalne wartości dla trzecich harmonicznym (klasa A i C) prąd zasilania takiej żarówki ze ściemniaczem musiałby mieć wartość  $\sim 7,67 A$ , czyli żarówka ma mieć moc  $P > 1764 W$ ? Czy ma to być jedna żarówka czy cały system oświetleniowy. Dlaczego mimo rozwoju techniki używa się określenia „żarówka” a nie system oświetleniowy? W innym miejscu tej samej normy podano, za badania powinny być wykonywane przy

obciążeniu 100%. Czy komitet opracowujący normę nie bierze pod uwagę stosowania nowoczesnych systemów sterowania.

W normach dotyczących wymagań oświetleniowych w miejscach pracy oraz w zaleceniach dotyczących projektowania [3,4] wielokrotnie przewija się zalecenie stosowania sterowania oświetleniem ale jak dotąd nie ma tam informacji o pomiarach energii elektrycznej w czasie odbiorów instalacji.

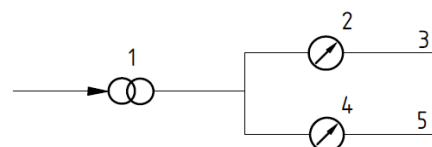
Norma dotycząca charakterystyki energetycznej budynków określa wymagania dotyczące oświetlenia wnętrz [8]. Przedstawiono tu metodykę wyznaczania liczbowego wskaźnika energii oświetlenia LENI.

$$(1) \quad LENI = \frac{F_C \cdot P_{Nj}}{1000} \left[ \frac{(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_N \cdot F_O) + 1}{t_y \cdot (t_y - (t_D + t_N))} + 1 \right]$$

gdzie:  $P_{Nj}$  – moc jednostkowa,  $F_D$  – współczynnik określający wpływ światła dziennego,  $F_O$  – współczynnik określający wpływ obecności pracowników w miejscu pracy,  $t_D$ , ( $t_N$ ) – czas użytkowania oświetlenia - w ciągu dnia, (nocy),  $t_y$  – całkowity czas użytkowania oświetlenia w ciągu dnia i nocy.

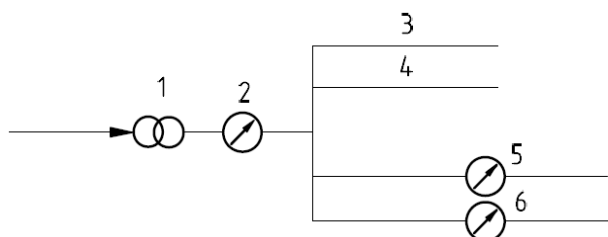
W normie zalecono przyjmowanie wartości współczynników  $F_O$  i  $F_D$  jako 0 – brak sterowania, 0,9 – sterowanie ręczne, 1 – sterowanie automatyczne. Niestety wyznaczana wartość wskaźnika LENI jest tylko prognozą czyli nie oddaje rzeczywistych wartości energii elektrycznej.

Pozytywnym sygnałem w sprawie rozliczania energii elektrycznej jest w tej normie umieszczone zalecenie wyodrębniania z instalacji elektrycznej obwodów oświetleniowych i stosowania w nich liczników energii elektrycznej (rys. 1.).

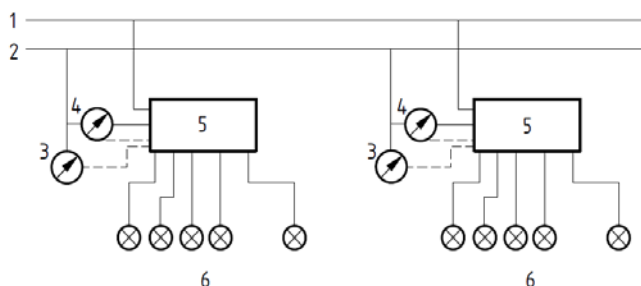


Rys. 1. Mierniki kWh w obwodach oświetleniowych sieci elektrycznej [11] 1 – moc pierwotna, 2 – miernik kWh w innych obwodach, 3 – obwód mocy, 4 – miernik kWh oświetlenia, 5 – obwód oświetlenia [8]

Instalacja wykonana według rysunku 2 pozwala na wyznaczenie wartości zużywanej energii z podziałem na poszczególne obwody oświetleniowe.



Rys. 2. Mierniki kWh w obwodach oświetleniowych sieci elektrycznej [11] 1 – moc pierwotna, 2 – miernik kWh moc całkowita, 3 – obwód mocy 1, 4 – obwód mocy 2, 5 – miernik kWh obwód oświetlenia 1, 6 – miernik kWh obwód oświetlenia 2 [8]



Rys. 3. Mierniki napięcia i prądu połączone z wejściami sterowników oświetlenia [11] 1 – magistrala, 2 – moc 230 volt, 3 - miernik napięcia, 4 – miernik prądu, 5 – sterownik światła, 6 – oprawy oświetleniowe [8]

Autorzy podobnie jak większość elektryków wiedzą co autor rysunków przedstawionych w normie [8] miał na myśli rysując schematy zamieszczone na rysunku 3 (moc 230V i podłączenie obu mierników). Proponują zamiast mierników napięcia prądu zastosować licznik statyczny włączony do sieci zgodnie ze schematem pomiaru mocy w układzie jednofazowym. W dalszych zaleceniach norma proponuje stosowanie rejestracji zużywanej energii i jej rejestrację w czasie do celów statystycznych.

Zapisy te są zgodne z wymaganiami dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej [7]. Państwa członkowskie są zobowiązane do umożliwienia końcowym odbiorcom energii dostępu do audytów energetycznych, nabycia po konkurencyjnych cenach indywidualnych liczników informujących o rzeczywistym zużyciu i czasie korzystania z energii (liczniki inteligentne). Audyty energetyczne, mają być oparte na następujących wytycznych:

- ich podstawą będą aktualne, mierzone, możliwe do zidentyfikowania dane operacyjne dotyczące zużycia energii i (w odniesieniu do elektryczności) profili obciążenia,
- zawierać będą szczegółowy przegląd profilu zużycia energii w budynkach lub zespołach budynków, obiektach lub instalacjach przemysłowych,
- będą proporcjonalne i wystarczająco reprezentatywne, aby pozwolić na określenie rzetelnego obrazu ogólnej charakterystyki energetycznej oraz wiarygodne określenie istotnych możliwości poprawy.

Audyty energetyczne umożliwiają przeprowadzenie szczegółowych i potwierdzonych obliczeń dotyczących proponowanych środków, tak aby dostarczyć klarownych informacji o potencjalnych oszczędnościach. Dane uzyskane w audytach energetycznych są przechowywane do celów analizy historycznej i kontroli wyników pomiarów energii elektrycznej.

## Wyniki pomiarów i analiz

Pomiary wykonano w obwodach oświetleniowych modernizowanej sali dydaktycznej oraz w biurowcu małej firmy zajmującej się projektowaniem systemów sterowania maszyn i urządzeń elektrycznych [15,16].

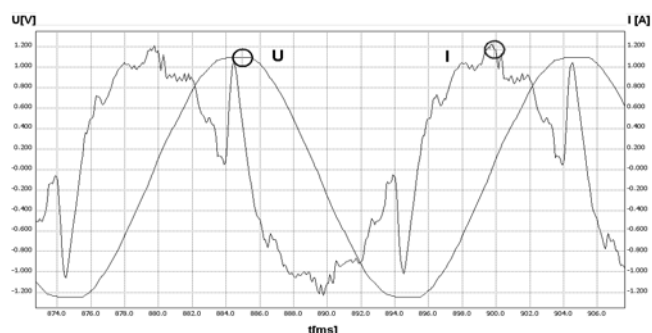
Sala dydaktyczna (pomiar 1) została wyposażona w oprawy ze źródłami LED o parametrach fotometrycznych i elektrycznych zgodnych z zapisami norm. Oprócz danych z deklaracji i raportów z badań inwestor sprawdził parametry wybranych opraw w niezależnym laboratorium pomiarowym.

Pomieszczenie jest wykorzystywane jako sala wykładowo-laboratoryjna. Realizowane są tu m.in. zajęcia wymagające od prowadzącego realizacji na bieżąco wykładu (rzutnik i ekran z omawianym fragmentem prezentacji – emitowany strumień świetlny na poziomie 20% mocy naprzemiennie z emisją strumienia świetlnego zapewniającą 750 lx na stanowiskach komputerowych. Zainstalowany system DMX sterowania oświetlenia automatycznie uwzględnia też wpływ światła dziennego (steruje też roletami). W instalacji zastosowano oprócz licznika statycznego składowych energii (czynna i bierna) układ kompensacji mocy z 7 stopniami kondensatorów i dławików (dobre na podstawie dodatkowych pomiarów). Przykładowe wartości parametrów elektrycznych instalacji oświetleniowej przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych instalacji sali dydaktycznej

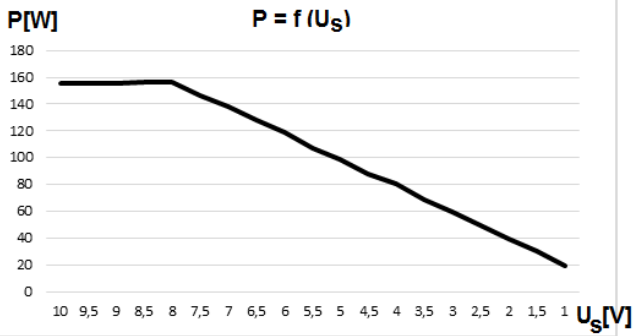
$E_{sr}$	U	I	P	Q	PF	tgφ	THD <sub>i</sub>
[lx]	[V]	[A]	[W]	[var]	[-]	[-]	[%]
750	230	2,88	652	12	0,96	0,12	4,0
600	230	2,87	651	11	0,96	0,13	4,1
500	230	2,86	652	10	0,97	0,14	4,2
400	230	2,87	652	11	0,97	0,12	4,2
300	230	2,87	653	12	0,97	0,10	4,1
200	230	2,87	654	11	0,97	0,11	4,3
150	230	2,88	655	12	0,97	0,11	4,1
100	230	2,85	655	13	0,97	0,10	4,1
50	230	2,85	650	12	0,96	0,13	4,2

Druga analizowana instalacja oświetleniowa (pomiar 2) w biurowcu jest wyposażona w oprawy ze źródłami fluorescencyjnymi (sterowanie 1-10V) oraz źródłami LED (sterowanie DALI). Zainstalowano tu sterowanie ale system oświetleniowy nie zawiera układu kompensacji i ograniczenia harmonicznych prądu. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów elektrycznych instalacji ze źródłami fluorescencyjnymi przedstawiono na rysunkach 4, 5, 6, 7.

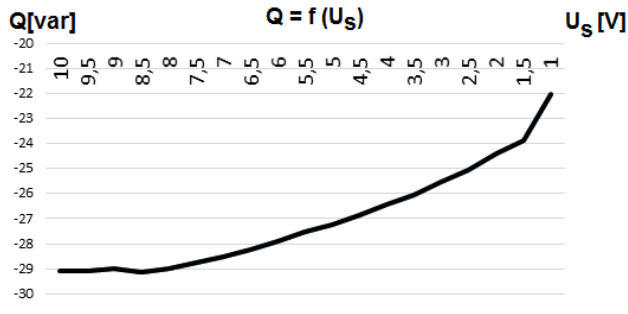


Rys. 4. Przebiegi napięcia i prądu zasilania opraw zze źródłami fluorescencyjnymi przy wartości sygnału sterującego 1V [opracowanie własne]

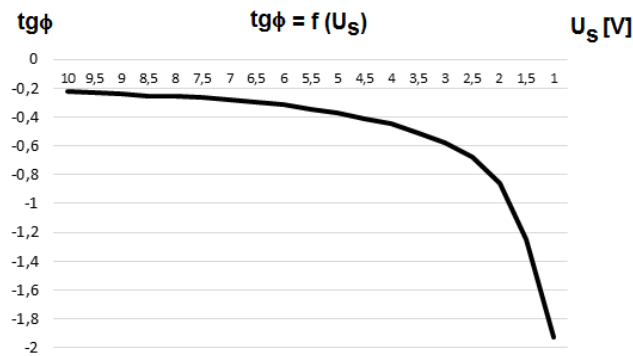
Jak przedstawiono na powyższym rysunku sinusoida prądu jest silnie odkształcona i przesunięta względem przebiegu napięcia (odbiornik energii o charakterze pojemnościowym). Instalacje wyposażone w sterowniki oświetlenia są narażone na przepływy energii biernej.



Rys. 5. Spadek wartości mocy czynnej instalacji oświetleniowej (sterowanie 1-10V) [opracowanie własne]



Rys. 6. Zmiana wartości mocy biernej instalacji oświetleniowej (sterowanie 1-10V) [opracowanie własne]



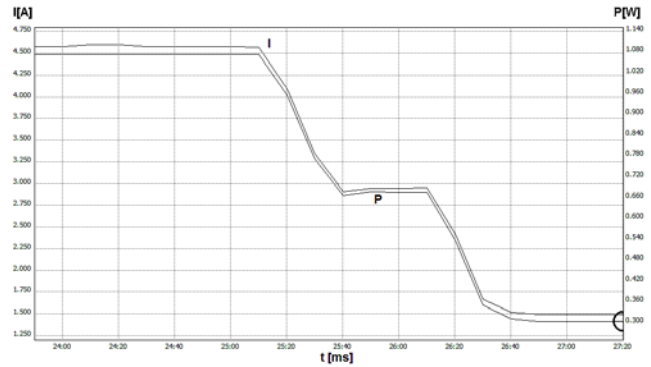
Rys. 7. Zmiana wartości współczynnika  $tg\phi$  (sterowanie 1-10V) [opracowanie własne]

W trakcie realizacji sterowania instalacji oświetleniowej można zauważyć zmniejszanie wartości współczynnika  $tg\phi$ . Jego wartość w całym przedziale sterowania jest ujemna. Dla małych wartości sygnału sterującego  $U_s \in (2,5 ; 1)$  [V] gwałtownie maleje. Oznacza to, że zastosowane elektroniczne układy zasilania i sterowania mają charakter odbiorników pojemnościowych.

Drugą część pomiarów w biurówcu (pomiar 3) wykonano w pomieszczeniach wyposażonych w oprawy ze źródłami LED. System sterowania był zrealizowany w oparciu o protokół DALI (rys. 8 i 9). Zastosowane oprawy LED były wyposażone w przekształtniki renomowanej firmy [17]. Zmierzone wybrane parametry elektryczne opraw LED przedstawiono w tabeli 2. Wyniki potwierdzają zgodność z przepisami UE [6, 18, 19].

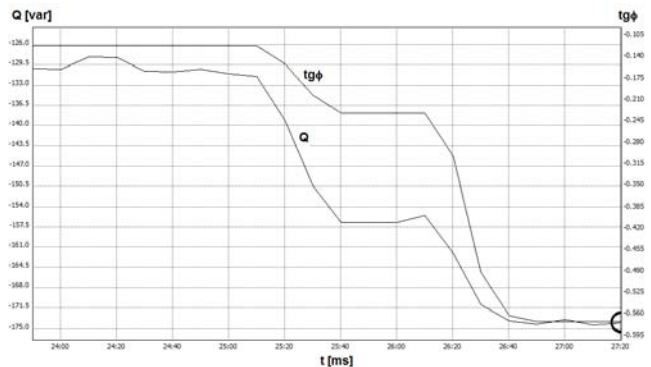
Tabela 2. Zmierzone wartości wybranych parametrów elektrycznych zastosowanych opraw LED

U	I	P	Q	S	PF	$tg\phi$	THD <sub>i</sub>
[V]	[A]	[W]	[var]	[VA]	[-]	[-]	[%]
230	0,381	86,22	-13,72	-87,62	0,984	-0,159	8,586



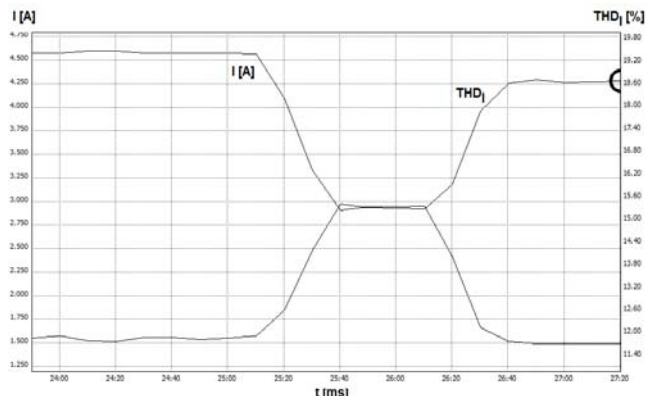
Rys. 8. Zmniejszanie wartości pobieranego prądu I oraz mocy czynnej P opraw LED wraz ze zmniejszaniem emitowanego strumienia świetlnego (algorytm protokołu DALI) [opracowanie własne]

Wartości prądu I oraz mocy czynnej P w trakcie sterowania maleją ( $I \in (4,5 ; 1,5)$  [A];  $P \in (1,08 ; 0,3)$  [W]) - maleje strumień świetlny - instalacja działa pozornie poprawnie. Na rysunku 11 przedstawiono zmiany wartości mocy biernej i współczynnika  $tg\phi$ . Wartość mocy biernej Q zmienia się w przedziale (-129 ; -560) [var].



Rys. 9. Zmiana wartości mocy biernej Q oraz współczynnika  $tg\phi$  opraw LED wraz ze zmniejszaniem emitowanego strumienia świetlnego (algorytm protokołu DALI) [opracowanie własne]

Wartość współczynnika  $tg\phi$  podobnie jak dla opraw ze źródłami fluorescencyjnymi jest ujemna i gwałtownie maleje w dolnej części przedziału sterowania strumieniem świetlnym ( $tg\phi \in (-0,14 ; -0,57)$ ).



Rys. 10. Zmiana wartości współczynnika zawartości harmonicznych THD<sub>i</sub> wraz ze zmniejszaniem wartości prądu zasilania I opraw LED (zmniejszaniem emitowanego strumienia świetlnego - algorytm protokołu DALI) [opracowanie własne]

Wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD<sub>i</sub> rośnie wraz z maleniem wartości prądu ( $THD_i \in (11,70 ; 18,60)$  [%]).

## Wnioski

Układy sterowania umożliwiają dopasowanie poziomu natężenia oświetlenia do realizowanych zadań wzrokowych. Prawidłowy dobór opraw i źródeł oraz parametrów fotometrycznych w pomieszczeniach nie powinien zakończyć projektowania instalacji. Należy również (zgodnie z przepisami) zastosować liczniki energii elektrycznej wraz z rejestracją mierzonych parametrów.

Zrealizowano pomiary w trzech różnych konfiguracjach odbiorników (oprawy ze źródłami fluorescencyjnymi oraz ze źródłami LED). Zastosowane układy sterowania są przedstawicielami trzech dostępnych rozwiązań (1-10V, DALI i DMX) [20].

Tylko w pierwszym przypadku (pomiar 1 – tabela 1) wartości mierzonych parametrów spełniają zapisy norm. Stwierdzono ponadto, mimo realizowanego poprzez układ sterowania spadku strumienia świetlnego, prawie niezmienny pobór mocy czynnej i pobieranego prądu zasilania. Wynika to z pracy układów wspomagających (wzrost zużycia energii przy zmniejszaniu strumienia świetlnego).

Pomiarów w biurcu (pomiar 2 - oprawy ze źródłami fluorescencyjnymi) dokonano dla obwodu złożonego z kilku opraw ale można założyć, że pozostałe odbiorniki oświetleniowe oraz układy elektroniczne sterujące też mają charakter pojemnościowy.

Instalacja oświetleniowa (pomiar 3) pracująca z maksymalnymysterowaniem spełnia zapisy normy [11] określającej zawartość harmonicznych  $THD_1 \leq 15\%$ . Ta sama instalacja przy minimalnej emisji strumienia świetlnego już tego zapisu nie spełnia  $THD_1 = 18,60\%$ .

Na podstawie pomiarów wykonanych w obiekcie biurowym stwierdzono, że stosowanie nowoczesnych źródeł światła i ich osprzętu – układów elektronicznych powoduje, iż odbiorniki mają charakter pojemnościowy a co za tym idzie rosną koszty przepływu energii biernej pojemnościowej. Praca układów sterowania powoduje fluktuacje parametrów elektrycznych, które należy skompensować. Im większa „płynność” sterowania (zalecane stosowanie zwłaszcza czujników ruchu) tym przepływy energii będą większe. Powodować to będzie również duże zmiany wartości przepływających prądów oraz zmienne warunki cieplne pracy przewodów i osprzętu elektrycznego.

Analizując wyniki zrealizowanych badań i pomiarów (zarówno własnych jak i innych autorów [1,2,15,16,19]) w instalacjach z obwodami oświetleniowymi i układami sterowania autorzy proponują przyjęcie do stosowania współczynnika efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej ze sterowaniem wyrażonego wzorem:

$$(2) e_{IOWS \max} = \frac{E_{m \max}}{Q_{\max}} \left[ \frac{Ix}{\text{var}} \right], e_{IOWS \min} = \frac{E_{m \min}}{Q_{\min}} \left[ \frac{Ix}{\text{var}} \right]$$

gdzie:  $e_{IOWS \max}$  – współczynnik efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej dla maksymalnej osiąganey wartości emitowanego strumienia świetlnego,  $e_{IOWS \min}$  – współczynnik efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej ze sterowaniem dla minimalnej osiąganey wartości emitowanego strumienia świetlnego,  $E_{m \max, \min}$  – wartość średnia natężenia oświetlenia w pomieszczeniu – odpowiednio max i min,  $Q_{\max, \min}$  – zmierzona wartość mocy biernej instalacji oświetleniowej – odpowiednio max i min.

W ramach pomiarów odbiorczych [21] (na podstawie ich wyników) powinna być określana wartość tego współczynnika ( $e_{IOWS \max}$  i  $e_{IOWS \min}$ ) dla maksymalnej i minimalnej wartościysterowania instalacji. Analiza otrzymanych wartości będzie stanowiła wskazówkę dla

użytkownika o celowości niezwłocznego sprawdzenia (pomiarów) wartości składowych energii aby uniknąć ponoszenia kosztów przepływów energii biernej indukcyjnej lub pojemnościowej.

**Autorzy:** dr inż. Marek Kurkowski, prof. dr hab. inż. Tomasz Popławski, mgr inż. Paweł Cieślak, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [farnaslight@wp.pl](mailto:farnaslight@wp.pl)

## LITERATURA

- [1] Pracki P.: Efektywność energetyczna oświetlenia obiektów użyteczności publicznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, R85 NR 9/2009, 328-331
- [2] Pabjańczyk W.: Energooszczędne instalacje oświetleniowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010, R86 NR 6/2010, 65-72
- [3] PN-EN 12464-1 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach
- [4] PN-EN 12464-2 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz
- [5] Dyrektywa 2014/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. Kompatybilność Elektromagnetyczna EMC
- [6] PN - EN 61000-3-2 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A)
- [7] Dyrektywa 2012/27/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2012 r. Efektywność energetyczna
- [8] PN-EN 15193 Charakterystyka energetyczna budynków -- Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia
- [9] Dyrektywa 2014/35/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. Niskonapięciowe Wyroby Elektryczne LVD
- [10] PN - EN 60598 - 1 Oprawy oświetleniowe. Wymagania ogólne i badania
- [11] PN-EN 62031 Moduły LED do ogólnych celów oświetleniowych -- Wymagania bezpieczeństwa
- [12] PN-EN 61347-1 Urządzenia do lamp -- Część 1: Wymagania ogólne i bezpieczeństwa, Część 2-3: Wymagania szczegółowe dotyczące elektronicznych urządzeń sterujących, zasilanych prądem przemiennym i/lub prądem stałym, do świetlówek,
- [13] PN-EN 61347-2-13 Urządzenia do lamp -- Część 2-13: Wymagania szczegółowe dotyczące elektronicznych urządzeń sterujących zasilanych prądem stałym lub prądem przemiennym do modułów LED
- [14] PN-EN 62386-101 Cyfrowy system sterowania oświetleniem -- Część 101: Wymagania ogólne -- Komponenty systemu
- [15] Kurkowski M., Cieślak P., Mirowski J., Popławski T., Jąderko A.: Analiza zawartości harmonicznych w instalacji elektrycznej obiektu biurowo technologicznego. Materiały XXV Sympozjum Środowiskowego PTZE Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Medycynie. Wieliczka, 28 czerwca - 1 lipca 2015, 173-174
- [16] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J., Chlewicka M., Cieślak P., Żelazny R.: Wyniki ekspertyz odbiorników energii elektrycznej (w tym oświetleniowych) oraz audytów instalacji elektrycznych, *materiały niepublikowane*
- [17] Philips Lighting, Systemy inteligentnego sterowania oświetleniem, Materiały promocyjne 2014
- [18] Rozporządzenie komisji (WE) nr 244/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego
- [19] Rozporządzenie komisji (UE) nr 1194/2012 z dnia 12 grudnia 2012 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia
- [20] Władziński W: Inteligentne sterowanie oświetleniem w budynkach przemysłowych. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 20, Gdańsk 2004, 211-216
- [21] IEEE Std 1459-2010 Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE, New York, 2010