

Pomiary energii biernej w instalacjach niskiego napięcia

Streszczenie. Problematyka artykułu dotyczy energii biernej odbiorników niskiego napięcia. Omówiono wybrane, obowiązujące zapisy dyrektyw, rozporządzeń i norm. Przedstawiono metodykę rozliczania energii biernej. Zaprezentowano wyniki badań i analiz dotyczących pomiarów składowych energii w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia (w tym także obwodów oświetleniowych).

Abstract. The issue of the paper relates to reactive energy consumed by low-voltage receivers. Chosen directives, regulations and standards being in force in Poland are discussed. The method for reactive energy settlement is presented as well. The results of researches and analyses are presented, referring to measurements of energy components performed in low-voltage installations (including lighting installations). (**Measurements of reactive energy in low-voltage installations**).

Słowa kluczowe: energia bierna, liczniki energii elektrycznej, kompensacja mocy biernej, instalacje elektryczne niskiego napięcia,.

Keywords: reactive energy, electricity meters, reactive power compensation, low-voltage electrical installation, lighting.

Wstęp

Jednym z przepisów wprowadzających w naszym kraju prawo unijne jest ustawa o efektywności energetycznej [1]. Aktualnie trwają prace nad kolejną jej nowelizacją [2]. Celem nowelizacji jest utrzymanie ram prawnych dla działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej gospodarki określonych m.in. przez dyrektywę 2006/32/WE [3] w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz stworzenie podstaw dla nowych rozwiązań zakreślonych w dyrektywie 2012/27/WE [4]. Projekt nowelizowanej ustawy przewiduje działania w trzech podstawowych obszarach zwiększenia oszczędności energii:

- w zakresie wytwarzania energii,
- w jej przesyłaniu i dystrybucji,
- przez odbiorców końcowych.

W artykule 13 projektu ustawy [2] założono także, iż poprawie efektywności energetycznej będą służyć m.in. modernizacja lub wymiana: oświetlenia lub urządzeń i instalacji wykorzystywanych w procesach przemysłowych lub w procesach energetycznych. W projekcie [2] nakazano również ograniczenie strat związanych z poborem mocy biernej (artykuł 13) oraz nakazano sporządzanie audytów na podstawie aktualnych, reprezentatywnych, mierzonych i możliwych do zidentyfikowania danych dotyczących zużycia energii (artykuł 27).

Realizacja ostatniego z wymienionych zadań będzie możliwa dzięki sukcesywnemu wprowadzaniu w europejskiej elektroenergetyce infrastruktury pomiarowej AMI (ang. *Advanced Metering Infrastructure*). Do 2020 roku wszyscy konsumenci energii elektrycznej (nie tylko odbiorcy instytucjonalni i przemysłowi ale także indywidualni) mają mieć możliwość kontrolowania swojego zużycia energii z podziałem na poszczególne opłaty. Prawo energetyczne [5] pozwala już dziś „w uzasadnionych przypadkach” na instalowanie liczników energii czynnej i biernej przez dostawców energii elektrycznej konsumentom należącym do wszystkich grup taryfowych.

Wraz z przyjęciem informacyjnej funkcji wdrażania AMI na rynku pojawiły się już rozwiązania techniczne, które umożliwiają jej spełnienie. Wdrożenie sieci inteligentnych i zwrot kosztów ich wprowadzenia nastąpi wówczas gdy odbiorcy energii z roli biernego użytkownika staną się aktywnymi prosumentami. Oczekuje się, że w konsekwencji podjętych działań nastąpi racjonalizacja zużycia energii poprzez obniżenie konsumpcji lub przesunięcie jej zużycia z okresów szczytowego zapotrzebowania.

Spełnienie tego zamierzenia nastąpi wtedy gdy zostaną oni wyposażeni w narzędzia umożliwiające ich

zaangażowanie. Jednymi z rozwiązań są urządzenia IHD (ang. *In-Home Display*), które duplikują część funkcji liczników. Informują one odbiorcę o bieżącym stanie liczników energii, podając również inne informacje informacyjnej, zebrane w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe informacje przedstawiane na IHD [6]

Informacje o przepływie energii elektrycznej	- bieżący pobór mocy oraz przepływy energii dla dowolnych okresów /dzień / tydzień miesiąc / okres rozliczeniowy, - należność do zapłaty za energię elektryczną, - bieżąca wartość współczynnika mocy ($tg\phi$), ...
Dane statystyczne	- wykres poboru składowych mocy, - rozliczanie składowych energii, ...
Inne	- taryfę energetyczną, - status połączenia z licznikami, - analizę identyfikacji odbiorników ...

Rozliczanie energii biernej

Podstawy prawne i sposób naliczania opłat za energię bierną określa rozporządzenie w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną [7]. W paragrafie 45.1 określono ponadumowny pobór energii biernej jako: „(...) ilość energii elektrycznej biernej odpowiadającą:

- ✓ współczynnikowi mocy $tg\phi$ wyższemu od umownego współczynnika $tg\phi_0$ (niedokompensowanie) i stanowiącą nadwyżkę energii biernej indukcyjnej ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika $tg\phi_0$,
- ✓ indukcyjnemu współczynnikowi mocy przy braku poboru energii elektrycznej czynnej,
- ✓ pojemnościowemu współczynnikowi mocy (przekompensowanie) zarówno przy poborze energii elektrycznej czynnej, jak i braku takiego poboru.”

W praktyce, rozliczenia ponadumownego poboru mocy opierają się na średnich wartościach współczynnika mocy, obliczanych za okres rozliczeniowy [8]. Dlatego, do naliczania opłat nie są brane chwilowe przekroczenia zadanego współczynnika $tg\phi_0$. Rozliczeniami za ponadumowny pobór energii biernej obciążani są odbiorcy zasilani z sieci średniego, wysokiego i najwyższego napięcia. Rozliczeniami tymi mogą być objęci w „uzasadnionych przypadkach” także odbiorcy zasilani z sieci o napięciu znamionowym nie wyższym niż 1kV, którzy użytkują odbiorniki o charakterze indukcyjnym, o ile zostało to określone w warunkach przyłączenia lub umowie o świadczenie usług dystrybucji energii elektrycznej lub umowie kompleksowej. Ponieważ przepisy nie definiują „uzasadnionego przypadku”, a odbiorniki o charakterze indukcyjnym użytkują dziś wszyscy odbiorcy (silniki,

lodówki, chłodziarki, oświetlenie ze źródłami wyładowczymi i LED, urządzenia elektroniczne itp.), dlatego rozliczeniem za ponadumowny pobór energii biernej może zostać objęty praktycznie każdy odbiorca zasilany napięciem poniżej 1 kV. W praktyce, poza dużymi i małymi zakładami przemysłowymi, usługowymi i biurowcami w pierwszej kolejności rozliczeniami zostają objęci odbiorcy zmieniający sprzedawcę energii elektrycznej. Podstawą do obliczenia kary jest wartość rzeczywistego współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$.

Jeżeli współczynnik mocy $\text{tg}\varphi$ jest wyższy niż wymagany współczynnik $\text{tg}\varphi_0$ (najczęściej jest to wartość 0,4) wówczas opłatę za ponadumowny pobór mocy biernej indukcyjnej oblicza się z zależności:

$$(1) \quad O_b = k \cdot C_{rk} \cdot \left(\sqrt{\frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{1 + \text{tg}^2 \varphi_0}} - 1 \right) \cdot A$$

gdzie: O_b - opłata za nadwyżkę energii biernej w złotych, k - ustalona w taryfie krotność ceny C_{rk} . Dla odbiorców zasilanych z niskiego napięcia wynosi ona najczęściej 3, a dla odbiorców zasilanych średnim napięciem 1, C_{rk} - średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym na dzień zatwierdzenia taryfy operatora, $\text{tg}\varphi_0$ - umowny współczynnik mocy (najczęściej 0,4), $\text{tg}\varphi$ - współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej, A - energia czynna pobrana całodobowo lub dla strefy czasowej w której jest prowadzona kontrola poboru energii biernej.

Przy występowaniu szybkozmiennych obciążeń mocą bierną, rozliczanie ponadumownego przepływu energii biernej ponad wartość współczynnika $\text{tg}\varphi_0$ jest przeprowadzane na podstawie bezpośredniego pomiaru nadwyżki energii biernej. Opłata jest obliczana na podstawie wzoru (1) z uwzględnieniem współczynnika $\text{tg}\varphi$ ustalanego według wzoru:

$$(2) \quad \text{tg} \varphi = \frac{\Delta E_b}{A} + \text{tg} \varphi_0$$

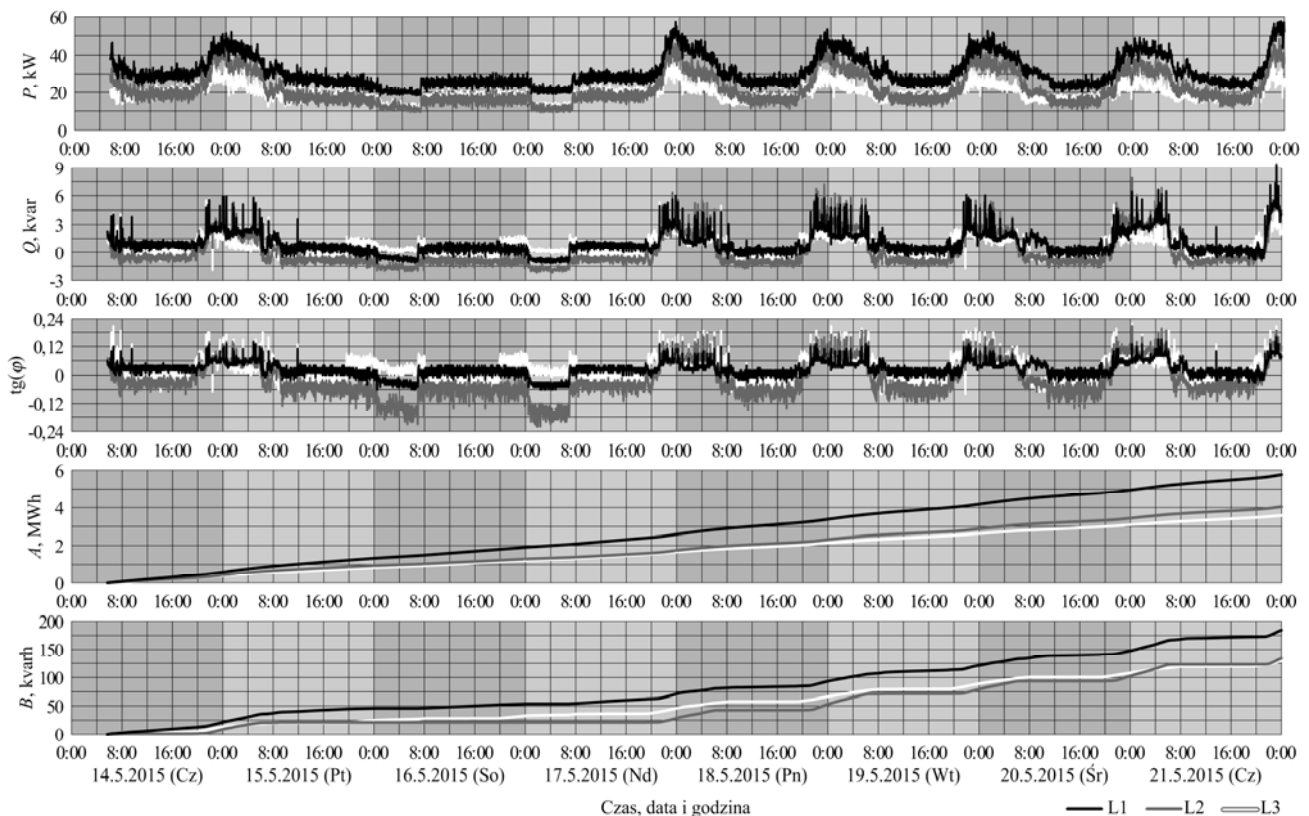
gdzie: ΔE_b - nadwyżka energii biernej wykazana przez urządzenie pomiarowe w okresie rozliczeniowym, pozostałe oznaczenia jak w (1).

W przypadku przepływu energii biernej pojemnościowej opłata obliczana jest jako:

$$(3) \quad O_b = k \cdot C_{rk} \cdot B$$

gdzie: B - energia bierna pojemnościowa oddana w okresie rozliczeniowym, pozostałe oznaczenia jak w (1).

Rozliczanie energii biernej jest realizowane za pomocą liczników energii biernej zarówno indukcyjnych [9] jak i statycznych [10,11]. Liczniki energii biernej są wykonywane w klasach dokładności - indukcyjne 3, a statyczne 2 i 3. W porównaniu z licznikami energii czynnej są mniej dokładne o rząd wielkości. Zmiany wprowadza norma z marca 2015 roku [1]. Ponadto w normie tej zapisano: „z przyczyn praktycznych niniejsza norma jest oparta na konwencjonalnej definicji energii biernej sinusoidalnych prądów i napięć zawierających tylko częstotliwość podstawową”. Oferowane na rynku liczniki energii elektrycznej muszą być zgodnie z zapisami dyrektywy MID (ang. *Measuring Instruments Directive*). Należy pamiętać, że wszystkie urządzenia metrologiczne o nazwie „licznik energii elektrycznej” będące w obrocie na terenie Rzeczypospolitej Polskiej podlegają obowiązkowi zatwierdzenia typu w Głównym Urzędzie Miar [12]. Liczniki energii biernej nie są sprawdzane i nie obejmuje ich procedura zatwierdzania typu.



Rys. 1. Zmiany poboru mocy OB1 (3 fazy, czas rejestracji – ponad 7 dni)

Analiza wyników pomiarów energii biernej w budynkach użyteczności publicznej

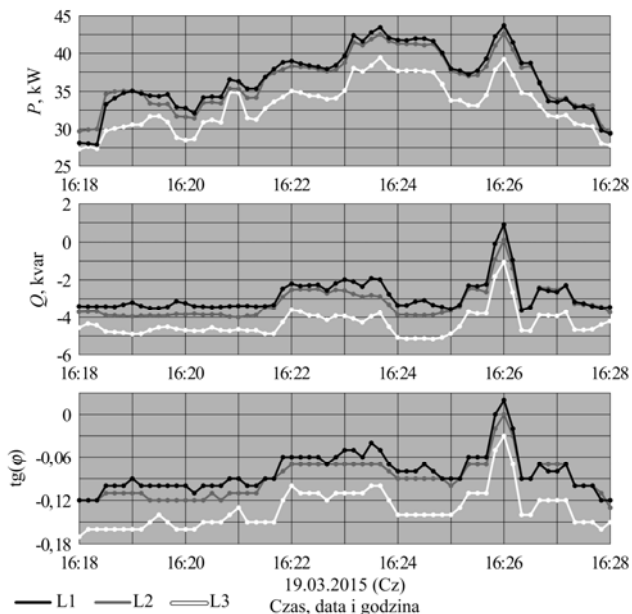
Analizie poddano 3 obiekty podłączone do zasilania 3x400 V, nie wyposażone w liczniki energii biernej. W celu oceny wartości pobieranej energii elektrycznej przeprowadzono rejestrację parametrów elektrycznych w rozdzielnicach zasilających budynki, a także zmierzono parametry wybranych instalacji oświetleniowych:

- obiekt biurowy „OB1” – odbiorniki energii (komputery, serwerownia, oświetlenie, ogrzewanie elektryczne, klimatyzacja, inne).
- obiekt rekreacyjno-usługowy „OB2” – odbiorniki energii (komputery, oświetlenie, ogrzewanie elektryczne basenu, klimatyzacja, inne).
- obiekt handlowy „OB3” – odbiorniki energii (oświetlenie, ogrzewanie elektryczne, chłodziarki, inne).

Energia elektryczna pobierana w badanych obiektach jest rozliczana tylko przez liczniki energii czynnej. Mimo to w rozdzielnicach zamontowano układy kompensacji mocy biernej (stałe baterie kondensatorów) wyznaczone dla mocy maksymalnej – wartości z projektów na podstawie niepełnych danych producentów urządzeń. Efektem takiego stanu są duże przepływy energii biernej – indukcyjnej i pojemnościowej (rys. 1).

Na podstawie wyników pomiarów można zauważyć duże różnice w poborze mocy (zarówno czynnej jak i biernej). Układy kompensacji pracują nieprawidłowo. W czasie weekendu i w porze nocnej powodują przekompensowanie układu i znaczny przepływ energii biernej pojemnościowej [13].

Zmierzone wartości energii biernej są dość duże ($B_1 - 200$ kvarh przy $A_1 - 6$ MWh). Wynikają z zastosowania przekształtników, zasilaczy i układów sterowania w większości odbiorników (oświetlenie LED, układy elektroniczne serwerów oraz baterie kondensatorów z układu kompensacji) [14,15]. Ponieważ obiekt pracuje w cyklu dziennie–nocnym, szybkozmiennych zmian wartości mocy biernej nie zarejestrowano.

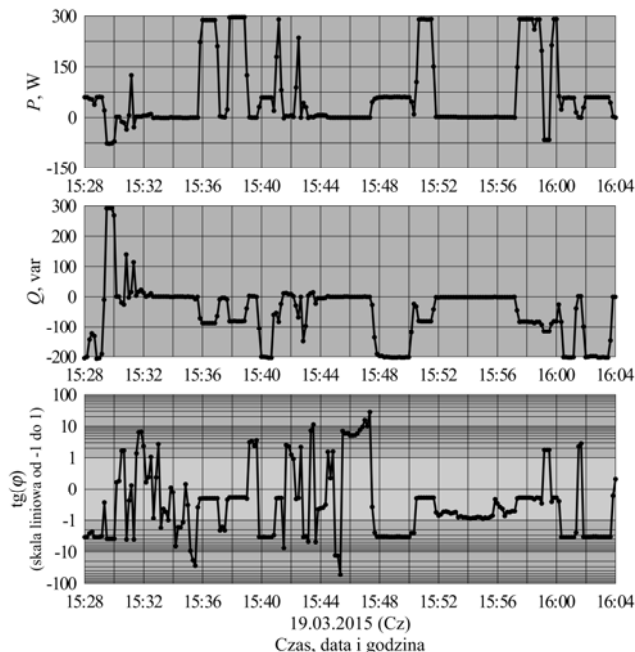


Rys. 2. Zmiany poboru mocy OB2 (3 fazy, czas rejestracji 10 min.)

Inaczej jest w obiekcie OB2. Spełnia on funkcje rekreacyjno-usługowe. Użytkowane tu odbiorniki energii elektrycznej (klimatyzacja, ogrzewanie basenu, oświetlenie) są włączane w zależności od potrzeb (automatycznie). Dlatego tu zarejestrowano szybkozmiennych obciążenia mocą bierną (rys. 2).

Jak przedstawiono na rysunku 2, wartość współczynnika mocy $\text{tg}\phi$ jest prawie w całym zmierzonym przedziale ujemna. Wynika to z niewłaściwej charakterystyki działania układów elektronicznych sterujących pracą odbiorników, a także z zastosowania baterii kondensatorów o stałej, nie regulowanej wartości pojemności.

Zarejestrowane zmiany wartości mocy czynnej i biernej oraz zmiany wartości współczynnika mocy $\text{tg}\phi$ są znaczne (rys. 3). Pomiary były realizowane w trakcie 40 minut eksploatacji opraw LED wyposażonych w sterowanie.



Rys. 3. Zmiany poboru mocy OB2ośw. (faza L1, obwód oświetleniowy – oprawy LED, czas rejestracji 36 min., brak kompensacji obwodu)

W obiekcie trzecim OB3 dokonano pomiarów wartości parametrów elektrycznych obwodów oświetleniowych złożonych odpowiednio z 3 opraw - OB31 i z 12 opraw - OB32 i przeznaczonych dla źródeł metalohalogenkowych z zastosowanymi źródłami retrofitami LED (rys.4.).



Rys. 4. Retrofit LED 27W E40

Wyniki pomiarów parametrów źródła retrofit LED przedstawiono w tabeli 2. Wyniki pomiarów parametrów instalacji oświetleniowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Wyniki pomiarów parametrów źródła retrofitu LED

Lp.	P	Q_i	PF	$\text{tg}\phi$	THD_i
	W	var	-	-	%
Retrofit LED pomiary w laboratorium					
1	18,53	-7,333	0,924	-0,396	10,58

Tabela 3. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych obwodów oświetleniowych – oprawy z retrofitami LED

Lp.	P	Q_i	PF	$\text{tg}\phi$	THD_i
	W	var	-	-	%
Obwód OB31					
1	59,28	-681,6	0,085	-11,50	17,52
Obwód OB32					
2	334,6	-1900	0,169	-5,678	21,65

Podsumowanie

Wszystkie 3 obiekty były wyposażone w układy kompensacji mocy biernej. Z uzyskanych wyników pomiarów, a także z zapisów prawa unijnego, wynika, że tylko pomiary dokonane w trakcie odbiorów instalacji pozwalają na precyzyjny dobór kompensacji z niezbędnym w tym przypadku sterowaniem bateriami kondensatorów i dławików. Takie podejście zmniejszy koszty eksploatacji, ale na etapie przetargu, spowoduje problem niemożliwego do ustalenia z góry kosztu układu kompensacji.

Prezentowane wyniki pomiarów zostały zrealizowane w budynkach nowych, wyposażonych w nowe urządzenia i instalacje niskiego napięcia. Na podstawie otrzymanych danych można stwierdzić, że koszty energii biernej (po założeniu liczników) będą bardzo duże.

O ile wyniki dla budynków OB1 i OB2 wynikają głównie ze złego doboru układów kompensacji to pomiary wykonane w instalacjach oświetleniowych OB2ośw. i OB3 potwierdzają wcześniejsze badania dotyczące przepływów energii biernej w tych instalacjach [16,17]. Oprawy oświetleniowe LED zgodnie z przepisami [18,19] mogą mieć współczynnik mocy PF nie większy niż 0,95 co jest równoważne z wartością $\text{tg}\varphi$ nie większą niż 0,329. Niestety, ustawodawca nie wziął pod uwagę, że układy zasilania stosowane w oprawach generują energię bierną pojemnościową (jak wynika z pomiarów, $\text{tg}\varphi$ nie mniejszy niż -0,329). Elektroniczne układy sterująco-regulacyjne nie mają określonego dopuszczalnego współczynnika mocy, co powoduje dalsze zwiększenie wartości energii biernej pojemnościowej [14,15]. Wyniki pomiarów przedstawione w tabeli 2 dały zaskakujące rezultaty w postaci wielokrotnego zwiększenia wartości mocy biernej pojemnościowej oraz zmniejszenia wartości $\text{tg}\varphi$. Porównując z danymi dla źródła LED (wcześniej nie eksploatowanego), zmierzonymi w laboratorium, można przypuszczać, że niewłaściwe zastosowanie źródeł LED jako zamienników w oprawach zaprojektowanych do źródeł wyładowczych mogło spowodować nieprawidłową ich pracę. Zbyt mała odległość od niepotrzebnego tu odbłyśnika i korpusu oprawy do źródeł wyładowczych mogła spowodować nieprawidłowe chłodzenie elementów źródła (układów elektronicznych przekształtnika i chipów LED) i w konsekwencji ich degradację. Wraz ze wzrostem temperatury maleje też emitowana wartość strumienia świetlnego źródła LED, a w konsekwencji uzyskiwane natężenie oświetlenia. Stanowi to zagrożenie dla trwałości eksploatowanych źródeł LED, a przede wszystkim, zwiększa przepływ energii biernej: $\text{tg}\varphi = -11,50$, moc czynna ok. 60 W a moc bierna -680 var!

Przepisy unijne transponowane do prawa polskiego już od kilkunastu lat nakazują oszczędność energii [3,4]. Wdrażane są kolejne dyrektywy i rozporządzenia. Ich zapisy są bardzo ogólne. Nakazują „ograniczenie strat związanych z poborem energii (...) na podstawie mierzonych (...) danych dotyczących przepływu energii”. Jednak warunki przetargowe, kryterium najniższej ceny wyboru projektu oraz urządzeń i instalacji elektrycznych, powodują powstanie obiektów, w których kosztach utrzymania są i będą duże opłaty za energię bierną.

Pozytywnym aspektem jest tu opublikowanie przez PKN nowelizacji normy dotyczącej liczników statycznych (m.in. poprawa ich klasy dokładności) [11]. Należy jednak poddawać liczniki energii biernej zatwierdzeniu typu.

Autorzy: dr inż. Marek Kurkowski, e-mail: marekk@el.pcz.czyst.pl, mgr inż. Jarosław Mirowski, dr hab. inż. Tomasz Popławski prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa; prof. dr hab. inż. Marian Pasko, dr inż. Tadeusz Białoń, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice.

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej Dz.U. 2011 nr 94 poz. 551, obowiązująca od 31.12.2016
- [2] projekt nowelizacji ustawy [1], stan na dzień 22.05.2015
- [3] Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/WE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej
- [5] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. z późniejszymi zmianami Prawo energetyczne Dz.U. z 2012 r., poz. 1059. Z 2013 r., poz. 984 i poz.1238, z 2014 r., poz. 457, poz. 490, poz. 900, poz. 942, poz. 11010, poz. 1662 oraz z 2015 r. poz. 151, poz. 478 i poz. 942
- [6] Billewicz K.: Wyświetlacz domowy IHD – przegląd doświadczeń z projektów szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną Dz.U. 2011 nr 189, poz. 1126 z późniejszymi zmianami
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 sierpnia 2011 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną Dz.U. 2011 nr 189, poz. 1126 z późniejszymi zmianami
- [8] Bielecki S.: Różne wartości mocy biernej w układzie elektrycznym zasilanym napięciem odkształconym Rynek Energii nr 6 (103) 2012, s. 23-26
- [9] PN-EN 62053-21:2006 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) -- Wymagania szczegółowe -- Część 21: Liczniki statyczne energii czynnej (klas 1 i 2)
- [10] PN-EN 62053-23:2006 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) -- Wymagania szczegółowe -- Część 23: Liczniki statyczne energii biernej (klas 2 i 3)
- [11] PN-EN 62053-24:2015-03 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) -- Wymagania szczegółowe -- Część 24: Liczniki statyczne energii biernej dla częstotliwości podstawowej (klas 0,5 S, 1 S i 1)
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać liczniki energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego, oraz szczegółowego zakresu sprawżeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych Dz.U. 2008 nr 11 poz. 63 z późniejszymi zmianami
- [13] Lange A., Pasko M.: Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmonicznych za pomocą filtrów biernych LC, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 nr 4, 2010, s. 126-129
- [14] Kurkowski M.: Efektywność energetyczna układów zasilania źródeł i modułów LED Oświetlenie LED 4/2014, s. 12-16
- [15] Kurkowski M.: Efektywność energetyczna stałoprądowych układów zasilania źródeł i modułów LED Oświetlenie LED 1/2015, s. 12-15
- [16] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J.: Energia bierna a przepisy Unii Europejskiej Rynek Energii nr 2 (111) 2014, s.18-25
- [17] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J., Chlewicka M., Cieślak P.: Wyniki ekspertyz odbiorników energii elektrycznej (w tym oświetleniowych) oraz audytów instalacji elektrycznych, *materiały niepublikowane*
- [18] Rozporządzenie komisji (WE) nr 244/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego
- [19] Rozporządzenie komisji (WE) nr 1194/2012 z dnia 12 grudnia 2012r. w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia