

Analiza wpływu kompensacji mocy biernej na wysokość opłat za energię elektryczną na przykładzie hali sportowej

Streszczenie. Poprawa efektywności energetycznej jest sprawą priorytetową w strategii energetycznej kraju. Jedną z możliwości jest kompensacja mocy biernej oraz optymalizacja mocy umownej. W artykule przeprowadzono analizę wpływu kompensacji mocy biernej na zmniejszenie opłat za energię elektryczną, którą przeprowadzono pod kątem możliwości zwiększenia efektywności energetycznej budynku. Przedmiotem rozważań jest problematyka kar nakładanych na odbiorców energii elektrycznych, którzy przekraczają dozwolony współczynnik mocy oraz metody optymalizacji kosztów zarządzania budynkiem. Przeprowadzone badania zostały zrealizowane oparciu o istniejący obiekt, w którym dokonano analizy. Dobrano także odpowiedni układ kompensacyjny w celu zmniejszenia kar finansowych nakładanych przez dystrybutora.

Abstract. A top priority in the energy strategy in Poland is to improve energy efficiency and quality. One of the possibilities is compensation of the reactive power and optimization of contractual capacity. The influence of reactive power compensation on reduction of costs of electricity, which influences the energy efficiency of the building is discussed in the paper. The aim of analysis is the issue of penalty charges imposed on electricity consumers, who exceed the permitted power factor and methods of optimization of the costs of building management. The analysis is carried out on the example of an existing building, for which proper analysis of power quality, selection a suitable compensation circuit to reduce the financial penalties imposed by the distributor is given. (**Analysis of the influence of reactive power compensation on the costs of electricity based on the example of a sports hall**).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, kompensacja mocy biernej, efektywność energetyczna, optymalizacja kosztów zarządzania.

Keywords: power quality, reactive power compensation, energy efficiency, optimization of management costs.

Wstęp

Racjonalne wykorzystywanie zasobów energii elektrycznej oraz poprawa efektywności energetycznej są sprawą priorytetową w strategii energetycznej Polski [1], [8]. Ustawa o efektywności energetycznej zakłada przedsięwzięcie szeroko zakrojonych działań, których głównym celem jest uzyskanie oszczędności energii [2]. Jednym z wykonawców tego planu będą jednostki samorządów terytorialnych, zobligowane do wdrożenia rozwiązań proekologicznych umożliwiających uzyskanie założonych wskaźników energetycznych.

Przykładem działań mogących przyczynić się do zwiększenia efektywności energetycznej jest odpowiednie zarządzanie przepływem mocy biernej w systemie elektroenergetycznym (SEE). Powszechnie znana problematyka przesyłu mocy biernej wpływa negatywnie na proces dostarczania energii czynnej do odbiorców końcowych (spadki napięć, straty mocy czynnej, ograniczenia zdolności przesyłowych) [3]. Nieodpowiednia ilość mocy biernej w krajowym SEE wpływa bezpośrednio na jakość energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców, która określona jest normatywnie np.: normą PN-EN-50160 [4].

Niemniej jednak, istotny wpływ na poziom przesyłanej mocy biernej ma charakter odbiorników oraz profil obciążenia mocy czynnej w danym obiekcie. W zależności od ilości zainstalowanych odbiorów oraz jednocześnie pracy profil obciążenia obiektu jest zmienny w czasie, przez co nasuwa się konieczność analizy odbiorów w celu określenia trendów poborów mocy.

Wzrost liczby zainstalowanych odbiorników nieliniowych takich jak układy prostownikowe czy tranzystorowe układy mocy, oraz pobór mocy biernej wpływa negatywnie, na jakość energii elektrycznej [3].

Zwiększony pobór mocy biernej przez odbiorców końcowych wymusza na dystrybutorach konieczność nakładania kary finansowych, stanowiących rekompensatę za przekroczenie umownego współczynnika mocy.

Odbiorca, który przekracza ustalony w taryfie energetycznej poziom poboru mocy biernej w stosunku do pobranej mocy czynnej obciążony jest, karami finansowymi. Zastosowanie kar umownych jest ściśle związane z grupą taryfową, występuje np.: w C21. Wysokość kar [5] wyznacza się zgodnie z zależnością (1)

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

gdzie: Q_b – opłata za nadwyżkę energii biernej w zł, C_{rk} – cena energii elektrycznej w zł/MWh, k – ustalona taryfa krotności ceny, A – energia czynna pobrana całodobowo

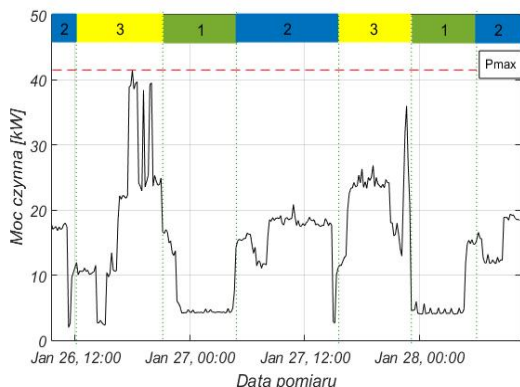
W niniejszym artykule analizowane są wyniki pomiarów jakości energii elektrycznej wykonane dla obiektu użyteczności publicznej, jakim była hala widowiskowo-sportowa. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono ponadumowny poziom poboru mocy biernej, który powodował zwiększenie kosztów eksploatacji budynku. Głównym celem analizy było przedstawienie możliwości rozwiązań umożliwiających wprowadzenie oszczędności w zarządzaniu tym obiektem.

Opisane w artykule badania ujęto w strukturę obejmującą cztery zasadnicze części. W pierwszej scharakteryzowano analizowany obiekt pod względem zainstalowanych odbiorników oraz rodzaju ich pracy, ponadto przedstawiono profil obciążenia obiektu, na podstawie którego wyodrębniono trzy stany pracy.

W kolejnej części zestawiono wybrane wyniki przeprowadzonych pomiarów jakości energii elektrycznej, wskazujące na zwiększony pobór mocy biernej. W części tej opisano także dobór układu kompensacji mocy biernej, który został zaproponowany zarządcy budynku w celu redukcji kosztów eksploatacyjnych.

Trzecia część badań to wyniki analizy jakości energii elektrycznej uzyskane po zastosowaniu kompensacji mocy biernej w okresie pięciu miesięcy od zrealizowanej inwestycji. W części tej porównano też poszczególne parametry jakości energii elektrycznej.

Ostatnia część badań poświęcona jest aspektom ekonomicznym, najistotniejszym z punktu widzenia inwestora, które potwierdzają zasadność inwestycji oraz określają okres spłaty. Są to aspekty sprawiające, że odbiorca końcowy decyduje się na inwestycje, których rezultaty w postaci oszczędności finansowych są odroczone w czasie, tym bardziej, że często osoby zarządzające są zobligowane do wprowadzenia oszczędności.



Rys. 1. Profil obciążenia obiektu z wyszczególnionymi przedziałami czasowymi przedstawiającymi trzy stany pracy.(1- praca nocna, 2- praca w okresie południowym, 3- praca w okresie popołudniowym

Charakterystyka badanego obiektu

Analiza jakości energii elektrycznej została przeprowadzona na podstawie pomiarów zrealizowanych w budynku hali widowiskowo-sportowej. Obiekt ten charakteryzował się cyklicznym obciążeniem (rys.1), które jest powtarzalne z częstotliwością jednego dnia. Związane jest to z pracą urządzeń podstawowych oraz grafikiem obciążeń hali.

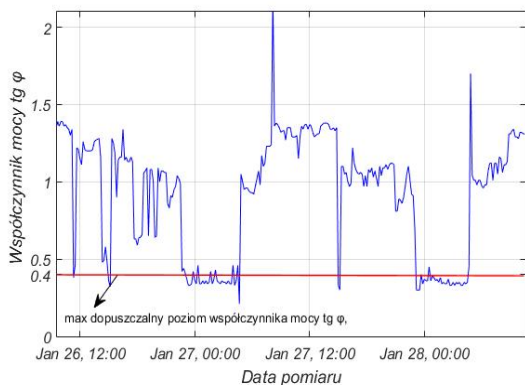
Do najbardziej energochłonnych grup odbiorników elektrycznych zaliczono min:

- Oświetlenie hali głównej, zrealizowane w oparciu o lampy wyładowcze metalohalogenkowe,
- Instalację klimatyzacji,
- Instalację wentylacji.

Przedstawiony profil obciążenia dobowego jest fragmentem dłuższej analizy i odnosi się do dwóch pełnych dni pracy obiektu. Na podstawie kształtu profilu dobowego wyodrębniono trzy stany pracy: a) praca nocna, b) praca w okresie przedpołudniowym (zajęcia szkolne) oraz praca w okresie wieczornym. Dodatkowo w trakcie analizy wzięto pod uwagę taryfę opłat za energię elektryczną.

W obiekcie hali widowiskowo-sportowej opłata za energię elektryczną realizowane jest zgodnie z taryfą C21. W taryfie tej za ponadumowny pobór energii biernej pobierane są opłaty zgodnie z (1). Ponadumowny pobór mocy biernej można rozumieć następująco:

- pobór energii elektrycznej przy współczynniku mocy wyższym od umownego,
- pobór energii biernej indukcyjnej przy braku poboru energii czynnej,
- pobór energii czynnej przy współczynniku pojemnościowym.



Rys. 2. Wykres czasowy wartości średniej współczynnika mocy (niebieski), max. umowna wartość współczynnika (czerwony).

Podstawą dokonania pomiarów jakości energii elektrycznej było zlecenie zarządcy budynku, podyktowane karami finansowymi nakładanymi za ponadumowny współczynnik mocy biernej.

W takich przypadkach wykonanie pomiarów jakości energii elektrycznej jest konieczne i ma na celu doborów układów kompensacyjnych oraz filtrów harmonicznych wyższych rzędów.

Analiza jakości energii elektrycznej

Maksymalny pobór mocy w badanym obiekcie występuje w godzinach wieczornych, tuż po zamknięciu obiektu. Związane jest to z działaniem urządzeń wentylacyjnych. Kontrola mocy czynnej miała na celu potwierdzenie zasadności zamówionej mocy.

Przekroczenie wymaganego współczynnika mocy było związane z charakterem zainstalowanych odbiorników. Z uwagi na fakt, że większość odbiorników miała charakter rezystancyjno-indukcyjny konieczne było zastosowanie kompensacji mocy biernej indukcyjnej.

Przedstawiona na rysunku 2 charakterystyka współczynnika mocy w funkcji czasu potwierdza ponadumowny poziom współczynnika mocy. Współczynnik ten zgodnie z założeniem powinien być niższy niż 0.4 [5].

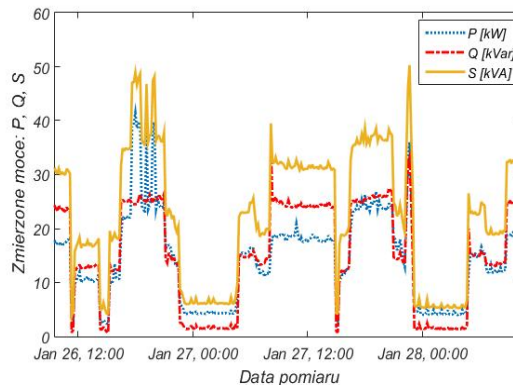
W analizowanym przypadku wielkości mocy czynnej, biernej i pozornej zostały wyliczone na podstawie teorii mocy Budeanu. Zgodnie nią moc czynna P i moc bierna Q została zdefiniowana, jako superpozycja mocy czynnych i biernych wszystkich harmonicznych przebiegu $u(t)$, $i(t)$ [6]. Wartości mocy czynnej P , biernej Q i pozornej S przedstawiono na rysunku 3.

$$(2) \quad P = U_0 I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} |U_h| |I_h| \cos \varphi_h$$

$$(3) \quad Q = \sum_{h=1}^{\infty} |U_h| |I_h| \sin \varphi_h$$

Wybór metody pomiarowej był podyktowany budową i zasadą działania urządzenia pomiarowego. Z uwagi na fakt, że wyznaczona moc bierna w oparciu o teorię Budeanu nie ma poprawnej interpretacji fizycznej [6] i nie jest miarą średniego przepływu energii pomiędzy elementami indukcyjnymi, wyniki pomiarów mocy biernej wykorzystano do zbadania maksymalnej wartości mocy biernej odbieranej w danym czasie. Oszacowanie maksymalnej mocy biernej wykorzystano do właściwego doboru mocy baterii kompensacyjnej.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów mocy czynnej biernej i pozornej zmierzonych w rozdzielni głównej.



Rys. 3. Zmierzone wartości mocy biernej Q(czerwony), czynnej P(niebieski) i pozornej S(żółty).

Analiza podstawowych parametrów związanych z poborem mocy w badanym obiekcie pozwoliła na zastosowanie układu kompensacji mocy bierniej indukcyjnej. Do poprawnego doboru mocy baterii zastosowano zależność (4), w której moc bierną układu kompensacyjnego wyznacza się w oparciu o średnią wartość współczynnika mocy w badanym obiekcie oraz zakładaną przez dystrybutora energię elektryczną.

$$(4) \quad Q_C = P_{\max} (tg(\varphi_1) - tg(\varphi_2))$$

gdzie: $tg(\varphi_1)$ – średni współczynnik mocy przed kompensacją, $tg(\varphi_2)$ – współczynnik mocy umowny, P_{\max} – moc maksymalna pobrana w okresie rozliczeniowym.

Oszacowanie mocy bierniej potrzebnej do skompensowania współczynnika mocy jest tylko jednym z wielu etapów doboru odpowiedniego układu kompensacji mocy bierniej. Istotnym elementem jest dobór dławików ochronnych do baterii pojemnościowych, które zabezpieczają je przed prądami harmonicznymi wyższych rzędów. W celu poprawnego doboru dławików ochronnych konieczna jest wiedza na temat zawartości wyższych harmonicznymi w analizowanym układzie zasilania [7].

Na podstawie znajomości współczynnika zawartości wyższych harmonicznymi THD (5) dobrano odpowiednią częstotliwość rezonansową układu bateria-dławik, jako częstotliwość pośrednią pomiędzy częstotliwościami mającymi najmniejszy udział w widmie pomiarowym.

$$(5) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_1}$$

gdzie: THD – współczynnik zawartości harmonicznymi, I_1 – wartość skuteczna prądu składowej podstawowej, I_k – wartość skuteczna prądu k-tej składowej

Częstotliwość rezonansową dobrano, jako częstotliwość pośrednią pomiędzy trzecią harmoniczną a harmoniczną podstawową. Na podstawie częstotliwości rezonansowej dobrano współczynnik tłumienia dławika zgodnie z (6).

$$(6) \quad p_{\%} = \left(\frac{f_n}{f_r} \right)^2 100 = \left(\frac{50Hz}{134Hz} \right)^2 100 = 14\%$$

Po kilku miesiącach eksploatacji dokonano pomiarów kontrolnych celem sprawdzenia poprawności funkcjonowania układu kompensacji oraz poboru mocy bierniej. Stwierdzono poprawny dobór układu kompensacji mocy bierniej oraz potwierdzono pomiarowo mniejszy pobór mocy bierniej, który wpłynął bezpośrednio na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych.

Porównanie układu skompensowanego i nieskompensowanego

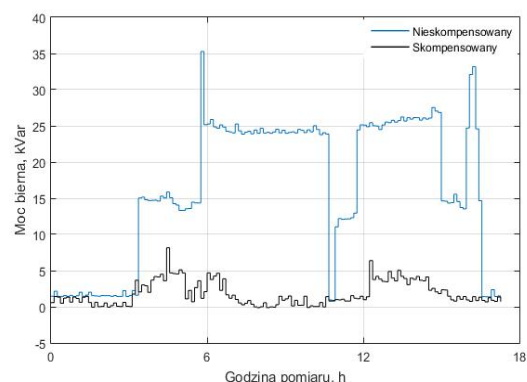
Zasadność doboru układów kompensacyjnych została potwierdzona już w pierwszym miesiącu jego użytkowania. Działanie układu spowodowało wyeliminowanie z rachunku za energię elektryczną kar umownych, związanych z przekroczeniem współczynnika mocy.

Niemniej jednak w celu potwierdzenia poprawności działania układu przedstawiono w dalszej części rozdziału wyniki porównania wielkości elektrycznych w układzie skompensowanym i w układzie nieskompensowanym. Z uwagi na fakt, że profil obciążenia hali jest dynamiczny i zależy od wielu różnych czynników, zestawienie wyników mocy bierniej ma charakter jakościowy.

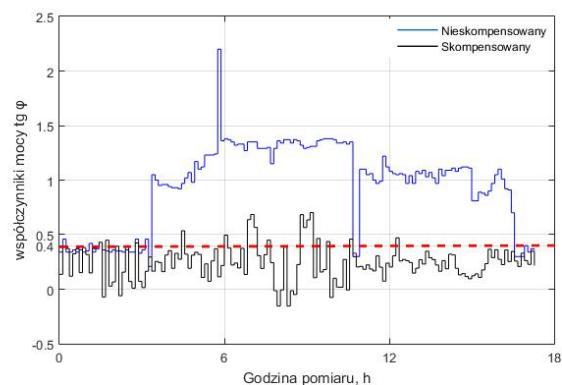
Pobór mocy bierniej w układzie skompensowanym i nieskompensowanym przedstawiono na rysunku 5. Wartość maksymalnej mocy bierniej pobieranej przez obiekt zmniejszyła się około pięciokrotnie, przez co znacząco zmniejszyły się rachunki za energię elektryczną, w których blisko 30% stanowiły kary finansowe. Nakładane kary finansowe były zależne od pobranej mocy czynnej w okresie rozliczeniowym oraz współczynnika mocy zgodnie z zależnością (1).

Jednym z powodów nakładanych kar finansowych były przekroczenia poziomu współczynnika mocy, którego wartość średnia blisko dwukrotnie przewyższała dopuszczalną. Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę wartości chwilowej współczynnika mocy dla układu skompensowanego i nieskompensowanego.

Zauważyć należy, że naddany układ kompensacji mocy bierniej pracował w taki sposób, aby wartość współczynnika mocy była mniejsza niż 0.4. Zadanie to było realizowane poprzez włączanie w obwód poszczególnych stopni kompensacyjnych.



Rys. 5. Porównanie profilu mocy bierniej w układzie skompensowanym (czarna linia) i układzie nieskompensowanym (niebieska linia)



Rys. 6. Porównanie wartości współczynnika mocy $tg \varphi$ w układzie skompensowanym (czarna linia) i układzie nieskompensowanym (niebieska linia), Czerwona linia- maksymalna, umowna wartość współczynnika mocy

Analiza ekonomiczna

Poprawa efektywności energetycznej przedsiębiorstwa bądź zarządzanego budynku polega na osiągnięciu tych samych rezultatów lub produktów przy minimalnym zużyciu energii elektrycznej [9]. Przeprowadzenie audytu energetycznego miało na celu przedstawienie możliwości usprawnienia pracy obiektu.

Optymalizacja kosztów związanych z poborem mocy bierniej przeprowadzona była w celu zmniejszenia opłat za energię elektryczną. Wymiernym potwierdzeniem skutecznie zrealizowanych działań jest aspekt ekonomiczny. To właśnie przedstawienie korzyści finansowych

wynikających z zastosowania powszechnie znanych układów kompensacyjnych oraz odpowiedniej taryfy energetycznej wpływa na podjęcie decyzji o inwestycji.

W Tabeli 1 zestawiono dane dotyczące zużycia energii elektrycznej, współczynnika mocy oraz nałożonych kar finansowych w okresie trzech miesięcy przed zastosowaniem układów kompensacyjnych.

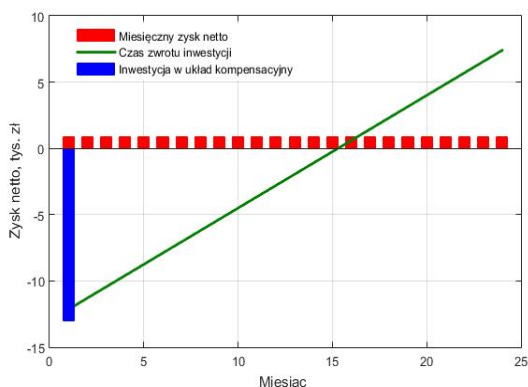
Tabela 1. Wybrane części rachunku elektrycznego będące podstawą analizy ekonomicznej

Parametr	Październik	Listopad	Grudzień
Energia czynna	9,15MWh	8,13MWh	7,32MWh
Współczynnik mocy	0,72	1,04	0,96
Kara finansowa	540zł	1130zł	861zł

Na podstawie wyników danych zawartych w Tabeli 1 oszacowano poszczególne parametry energii w skali roku. Średnioroczne zużycie energii elektrycznej oszacowano na poziomie 98,4 MWh, średnią wartość współczynnika mocy oszacowano na poziomie 0,9 oraz roczne kary finansowe na poziomie 10 125 zł.

Optymalizacja kosztów zużycia energii elektrycznej w budynkach użyteczności publicznej jest bezpośrednio związana z opłacalnością inwestycji oraz czasem zwrotu poniesionych wydatków. Do analizy wykorzystano metody statyczne, które nie uwzględniają zmienności wartości pieniądza w czasie.

Koszty związane z przeprowadzeniem analizy jakości energii elektrycznej, zakupu układów kompensacyjnych oraz koszty eksploatacyjne oszacowano na kwotę 13 000 zł. Szacowany okres zwrotu inwestycji wynosi więc 16-18 miesięcy, zakładając niezmienną stawkę za energię elektryczną oraz uśrednienia dotyczące pobranej energii elektrycznej i współczynnika mocy. Okres zwrotu nakładów inwestycyjnych związanych z zastosowaniem układu kompensacji mocy biernej indukcyjnej przedstawiono na rysunku 7. Nakłady inwestycyjne są ponoszone w pierwszym etapie życia projektu i są wydatkowane głównie na zakup odpowiedniego urządzenia kompensacyjnego.



Rys. 7. Wykres zwrotu inwestycji na kompensację mocy biernej; kolor żółty – koszt inwestycji, kolor pomarańczowy – miesięczne zyski z kompensacji mocy biernej, kolor niebieski – różnica pomiędzy nakładami a zyskami

Podsumowanie

Zwiększenie świadomości społecznej związanej z racjonalnym gospodarowaniem energią elektryczną znacząco wzrasta w ostatnich latach. Jedną z grup beneficjentów mogą być zarządcy budynków użyteczności publicznej, którzy dzięki wprowadzonym rozwiązaniom przyczynią się do lepszego gospodarowania środkami publicznymi oraz efektywniejszego przesylu mocy biernej.

W artykule przedstawiono kompleksowe podejście do optymalizacji kosztów na przykładzie hali sportowej bazujące na audycie energetycznym.

Zastosowano analizę jakości energii elektrycznej w celu poprawnego doboru układów kompensacji mocy biernej oraz układu filtrów harmonicznych wyższych rzędów. Przedstawiony w artykule przykład przedstawia zasadność implementacji nowoczesnych układów kompensacyjnych, szczególnie biorąc pod uwagę czynniki poprawy jakości energii elektrycznej, zmniejszenie przepływu mocy biernej i czynniki ekonomiczne.

Optymalizacja kosztów zarządzania obiektami jest w ostatnim czasie sprawą bardzo istotną, szczególnie biorąc pod uwagę konieczność racjonalnego gospodarowania zasobami energetycznymi.

W artykule przedstawiono zasadność zastosowania układów kompensacji mocy biernej, która została potwierdzona analizą ekonomiczną.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Habelok, dr inż. Mariusz Stępień, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: krzysztof.habelok@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Ministerstwo Gospodarki Projekt Polityki energetycznej Polski do 2050 roku- wersja 0.6, Warszawa, sierpień 2015, 4-7
- [2] Ustawa z dnia 20.05.2016 r. o efektywności energetycznej, Dz.U.2016 poz.831,2016, 1-23,
- [3] Bielecki S.: Przegląd metod rozliczeń za moc bierną. „Przegląd Elektrotechniczny” 2015, R. 91, nr 9, s. 61-64.,
- [4] Polska Norma PN-EN 50160:2010 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych”
- [5] Bućko, P., Wilczyński, P.: Rozliczenia za energię bierną w taryfach operatorów w Polsce „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 42” ISSN 2353-1290, Nr 42/2015 s. 200-204.,
- [6] Kuczewski, Z., Walczak, J., Pasko, M.: Moce w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi „Jakość i użytkowanie energii elektrycznej”, tom 1, zeszyt 1 rok 1995 s. 31-32.,
- [7] Barlik R., Nowak M.: Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy. Przegląd Elektrotechniczny 2005 nr 7-8,
- [8] Paska, J., Surma, T.: Polityka energetyczna Polski na tle polityki energetycznej Unii Europejskiej, Polityka Energetyczna, Tom 16, zeszyt 4 rok 2013, ISSN 1429-6675.,
- [9] Błajszczak G: Efektywność energetyczna– przegląd przepisów i norm, Energetyka, str. 597, październik 2011.