

dr inż. Jakub Grela

Moc bierna

Jedną z najważniejszych wielkości opisujących właściwości energetyczne obwodów elektrycznych jest moc. Natomiast podstawowym parametrem będącym podstawą do dokonywania rozliczeń finansowych pomiędzy dostawcą a odbiorcą nie jest moc a energia elektryczna, która odpowiada iloczynowi mocy i czasu.

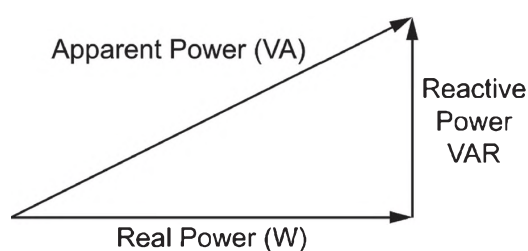
Wyróżnia się kilka rodzajów mocy:

- P – oznaczenie stosowane dla mocy czynnej (ang. *Real* lub *Active Power*), jednostka W;
- Q – oznaczenie stosowane dla mocy biernej (ang. *Reactive Power*), jednostka var;
- S – oznaczenie stosowane dla mocy pozornej (ang. *Apparent Power*), jednostka VA;

Mimo, iż wymienione trzy odmiany są najbardziej znanymi, nie oznacza to, że nie występują inne rodzaje mocy.

Powszechnym w nauczaniu szkolnym jest określanie zależności mocy czynnej, biernej i pozornej w ramach tzw. trójkąta mocy (rysunek nr 1), którego właściwości wyraża równanie:

$$P^2 + Q^2 = S^2 \quad (1)$$



Rysunek 1 – Trójkąt mocy.

Stanowczo należy podkreślić, że równanie 1 jest poprawne jednak tylko dla układów z sinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć.

Warto pamiętać, że moc czynna P jest wielkością o ścisłym znaczeniu fizycznym i wyraża ona zdolność układu do wykonania danej pracy (tzw. pracy użytkowej – przykładowo związana jest z energią elektryczną przetwarzaną na energię mechaniczną, ciepłą bądź świetlną.) Innymi słowy jest to ten rodzaj mocy, który jest najbardziej pożądany przez odbiorców energii i to właśnie za dostarczoną tylko moc czynną w okresie rozliczeniowym (energię czynną zmierzoną przez liczniki energii elektrycznej u każdego odbiorcy) nabywca chciałby

płacić dostawcy energii.

Graficzną reprezentację przebiegu mocy przedstawia rysunek nr 2, zaś podstawowy wzór na obliczanie mocy czynnej przedstawia równanie:

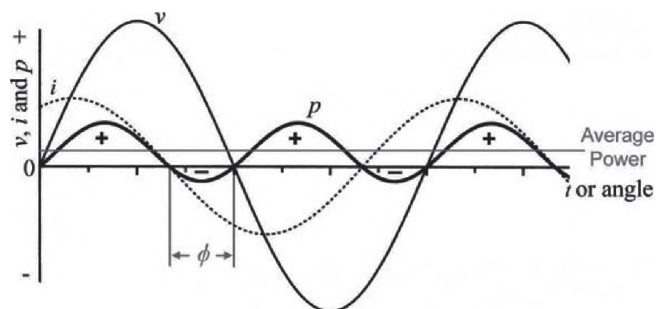
$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)i(t)dt \quad (2)$$

gdzie:

u(t) - chwilowa wartość napięcia;

i(t) - chwilowa wartość prądu;

T - okres za jaki liczona jest moc;



Rysunek 2 – Przebiegi napięcia (v), prądu (i) i mocy (p). Okresy, w których przebieg p przyjmuje wartość ujemną związane są z występowaniem mocy biernej.

Wzór wyrażony równaniem 2 w jednofazowych układach sinusoidalnych przyjmuje postać:

$$P = UI \cos \varphi \quad (3)$$

gdzie:

U - wartość skuteczna napięcia;

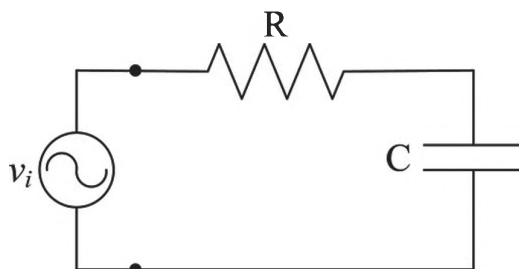
I - wartość skuteczna prądu;

φ - kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem;

Z kolei, moc bierna nie jest powszechnie określana jako moc użyteczna, a jako związana z wytworzeniem określonych warunków fizycznych (wytworzenie pól magnetycznych i elektrycznych, gromadzenie energii w polu magnetycznym i elektrycznym itp.). Powszechnie znany wzór na moc bierną przyjmuje postać:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (4)$$

Zależność przedstawiona równaniem 4 poprawna jest jedynie dla jednofazowych obwodów z sinusoidalnymi przebiegami napięcia i prądu. W takich układach interpretacja mocy biernej brzmi, że jest to amplituda składowej przemiennej mocy chwilowej na zaciskach źródła. Dodatkowo występowanie pewnej niezerowej wartości tej mocy ma świadczyć o dwukierunkowym i oscylacyjnym przepływie energii między źródłem a odbiornikiem. Rozważając jednofazowy obwód z sinusoidalnym źródłem napięcia, którego obciążeniem jest dwójnik RC (jak na rysunku nr 3), przebieg prądu źródła będzie miał charakter sinusoidalny, ale ze względu na właściwości kondensatora będzie on przesunięty względem napięcia źródła - w takich warunkach elementy te zachowują się liniowo. W takim obwodzie moc bierna Q będzie niezerowa i może być interpretowana jako amplituda oscylacji energii, która jest na przemian gromadzona w kondensatorze i oddawana do źródła. Moc czynna kondensatora jest równa zero. Należy zauważyć, że wspomniane zjawisko oscylacji energii między źródłem a odbiornikiem wydaje się być tylko skutkiem i to występującym w szczególnych przypadkach obwodów z sinusoidalnym przebiegiem prądu i napięcia, a nie przyczyną powstawania mocy biernej. Badania prowadzone w tym zakresie dowodzą, że moc bierna występuje również w obwodach, w których nie zachodzą żadne oscylacje energii. W nowych publikacjach dotyczących teorii mocy jako jedyne zjawisko fizyczne, które zawsze towarzyszy występowaniu mocy biernej, wymienia się przesunięcie fazowe między prądem a napięciem.



Rysunek 3 – Dwójnik RC.

Jeżeli zatem zależność z równania 4 (do obliczania mocy biernej), jest słuszna jedynie dla jednofazowych obwodów sinusoidalnych, nasuwa się pytanie dotyczące sposobu wyliczania mocy biernej w układach niesinusoidalnych. Okazuje się, że definicja mocy biernej w rzeczywistych układach (a nie tylko tych wyidealizowanych), jest przedmiotem kontrowersji i wielu burzliwych dyskusji środowiska elektrotechnicznego. Ponadto nie ma jednej i ogólnie akceptowanej definicji mocy biernej w układach z niesinusoidalnymi przebiegami napięcia i prądu, nie wspominając tu nawet o nie zrównoważonych obwodach trójfazowych. W standardzie Międzynarodowej Organizacji Inżynierów Elektryków i Elektroników (IEEE) o numerze 1459-2010 (z roku 2010) dla obwodów niesinusoidalnych trójfazowych nie został podany wzór na całkowitą moc bierną. Natomiast jako trzy podstawowe moce wymieniono moc czynną, pozorną i nieaktywną oznaczaną literą N . Moc bierną ograniczono jedynie do składowej podstawowej prądu i napięcia i oznaczono Q_1 . Wspomniany standard jest

dokumentem wydanym przez uznaną organizację, który miał uporządkować tematykę dotyczącą definicji mocy. Było to tym bardziej konieczne, że w środowisku naukowym od wielu już lat wzmagają się głosy, że dotychczas używane definicje mogą dawać błędne wyniki. Kontrowersje dotyczyły przede wszystkim definicji mocy biernej i pozornej (a także mocy odkształcenia) w obwodach jedno- i trójfazowych z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów.

W 1987 roku prof. L. Czarnecki dowiódł błędności szeroko rozpowszechnionej definicji mocy biernej wg Budeanu - która jest dalej często nauczana i przyjmuje postać:

$$Q_B = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (5)$$

gdzie:

U_n i I_n są harmonicznymi napięcia i prądu rzędu n , a φ_n kątami między tymi składowymi.

Wspomniana moc odkształcenia, opisana zależnością w równaniu 6, miała reprezentować w układzie moce pojawiające się w skutek odkształceń przebiegów napięcia i prądu. Należy zaznaczyć, że wprowadzenie nowej wielkości mocy odkształcenia sprawiło, że znane dotychczas równanie trójkąta mocy (równanie 1) nie było spełnione dla obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi.

$$D_B = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_B^2)} \quad (6)$$

Od lat kojarzono moc bierną z oscylacjami energii między źródłem a obciążeniem. Na podstawie przytoczonych wzorów, łatwo można zauważyć, że według definicji Budeanu moc bierna jest sumą mocy biernych poszczególnych harmonicznymi. W zależności od wartości kąta między napięciem a prądem danej harmonicznymi składowe te mogą być dodatnie lub ujemne - czynnik $\sin \varphi$. Zatem jest możliwa sytuacja, kiedy całkowita moc bierna Q_B będzie wynosiła zero przy niezerowych składowych harmonicznymi. Obserwacja, że przy niezerowych składowych sumaryczna moc bierna według tej definicji może wynosić zero jest kluczowa do przeprowadzenia głębszej analizy, która ostatecznie pozwoliła na udowodnienie, że wielkość Q_B może przyjmować w pewnych sytuacjach zupełnie zaskakujące wyniki. Przeprowadzone w tym zakresie badania poddają w wątpliwość powszechnie panujące przeświadczenie, iż istnieje jakikolwiek związek między oscylacjami energii a mocą bierną Budeanu (Q_B). Można podać przykłady obwodów, w których mimo istnienia oscylacyjnego charakteru przebiegu mocy chwilowej, moc bierna wg definicji Budeanu wynosi zero. Na przestrzeni lat naukowcy nie potrafili powiązać z mocą bierną według tej definicji żadnego zjawiska fizycznego.

Wspomniane w poprzednim akapicie wątpliwości związane z poprawnością tej definicji mocy biernej, nie pozostają bez znaczenia dla powiązanej z nią mocą odkształcenia D_B - patrz równanie 6. Dlatego też postanowiono znaleźć odpowiedź na pytanie czy moc odkształcenia D_B rzeczywiście jest miarą odkształcenia przebiegów w obwodach niesinusoidalnych. Dla

SYGNALIZATORY ŚWIETLNE I DŹWIĘKOWE

- ◀ Kolumny sygnalizacyjne
- ◀ Sygnalizatory optyczno-akustyczne
- ◀ Małe gabaryty
- ◀ Wiele możliwości montażu
- ◀ Pełny zakres napięcia zasilania
- ◀ Mocne, widoczne światło - stałe lub w różnych wariantach światła przerywanego
- ◀ 8 różnych sygnałów dźwiękowych, nawet 130 dB!



przypomnienia, w uproszczeniu, odkształceniem nazywana jest sytuacja, gdy przebieg napięcia nie daje się „nałożyć” na przebieg prądu przy wykorzystaniu dwóch operacji: zmieniając amplitudę i przesuwając w czasie. Innymi słowy, napięcie nie jest odkształcone względem prądu, jeśli jest spełniona następująca zależność:

$$u(t) = Ai(t - \tau) \quad (7)$$

W przypadku napięcia sinusoidalnego i obciążenia będącego dowolną kombinacją elementów RLC warunek ten jest zawsze spełniony (dla przebiegu sinusoidalnego elementy te zachowują liniowość). Jednak, gdy napięcie jest odkształcone obciążenie RLC nie zapewnia już nie odkształcenia prądu względem napięcia i nie stanowi już obciążenia liniowego – konieczne jest spełnienie pewnych dodatkowych warunków (odpowiednio zmieniający się z częstotliwością moduł i faza impedancji obciążenia).

Udowodniono, że moc odkształcenia może być równa zero w sytuacji, gdy napięcie jest odkształcone względem przebiegu prądu i odwrotnie, moc odkształcenia może być niezerowa przy zupełnym braku odkształceń.

Praktyczny aspekt teorii mocy, dotyczący poprawy współczynnika mocy układów z mocą bierną, miał być tym czynnikiem, który najbardziej zyska na poprawnych definicjach mocy biernej. Próby kompensacji opierające się na mocy biernej wg Budeanu i powiązanej z nią mocą odkształcenia okazały się bezskuteczne. Wielkości te nie pozwalały nawet na poprawne obliczenie pojemności kompensującej, dającej maksymalny współczynnik mocy. Dochodziło nawet do tego, że takie próby kończyły się dodatkowym pogorszeniem tego współczynnika.

W roku 2000 organizacja IEEE opublikowała standard 1459, którego nazwa brzmi: „Definicje do pomiarów wielkości związanych z mocą elektryczną w warunkach sinusoidalnych, niesinusoidalnych, symetrycznych i niesymetrycznych”. Było to istotnym wydarzeniem, a w dokumencie tym po raz pierwszy moc bierna wg definicji Budeanu znalazła się w grupie definicji niezalecanych, których nie należy stosować w nowych miernikach mocy i energii biernej. Widoczne też było podzielenie wielu wielkości na te związane z podstawową składową prądu i napięcia (pierwszą harmoniczną) i pozostałymi wyższymi harmonicznymi. W większości przypadków uznaje się bowiem, że użyteczna część energii jest przenoszona właśnie za pomocą składowych 50/60 Hz, przy dużo mniejszym i często szkodliwym udziale wyższych harmonicznymi.

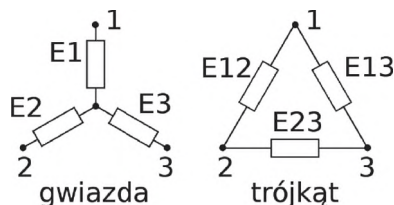
W standardzie pojawiła się również nowa wielkość – moc nieaktywna N , która reprezentuje wszystkie nieaktywne składniki mocy:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

W tym przypadku moc bierna jest jednym ze składników mocy nieaktywnej N . W układach jednofazowych z sinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów, N jest równe Q , zatem w mocy nieaktywnej nie ma innych składników. W obwodach trójfazowych taką właściwość mają jedynie sieci symetryczne, sinusoidalne, ze zrównoważonym odbiornikiem czysto rezystancyjnym. Kolejne składniki mocy nieaktywnej są związane z konkretnymi zjawiskami fizycznymi, które wpływają na zmniejszenie efektywności przesyłu energii ze źródła do odbiornika, czyli zmniejszenie współczynnika mocy (ang. *Power Factor*)

Kolejny ciekawy aspekt związany z mocą bierną dotyczy braku poprawności jej pomiaru w niesymetrycznych odbiornikach połączonych 3-przewodowo (układy typu trójkąt i gwiazda bez przewodu N – rysunek nr 4). Jak już wspomniano, w celu obliczenia mocy biernej konieczna jest znajomość kąta przesunięcia fazowego między prądem a napięciem występujących na każdej gałęzi odbiornika. W układzie odbiornika typu trójkąt znane są napięcia występujące na poszczególnych fazach (impedancjach), ale nie są znane prądy. W układach tego typu

mierzone są napięcia międzyfazowe i prądy liniowe. Każdy z prądów liniowych jest sumą dwóch prądów fazowych. Z kolei, w odbiornikach typu gwiazda bez przewodu N znane są prądy płynące przez daną fazę (impedancje), natomiast nie są znane napięcia (każde z napięć międzyfazowych jest sumą dwóch napięć fazowych).



Rysunek 4 – Układ 3-fazowy, 3-przewodowy, połączenie w gwiazdę (lewo) i w trójkąt (prawo).

Popularnym rozwiązaniem tego problemu, stosowanym przez producentów liczników mocy (a w konsekwencji energii) biernej, jest stosowanie sztucznego punktu odniesienia. Wytworzenie takiego punktu jest możliwe przez podłączenie do zacisków odbiornika układ trzech rezystorów o tej samej wartości i połączonych w gwiazdę. Potencjał punktu centralnego układu rezystorów jest używany do wyliczenia wartości napięć fazowych. Należy zaznaczyć, że uzyskane w ten sposób wyniki będą stosunkowo poprawne tylko, gdy niezrównoważenie odbiornika jest minimalne. W każdym innym przypadku wskazania mocy biernej takiego przyrządu należy traktować jedynie jako wartość przybliżoną.

Coraz powszechniej stosowane przez dostawców i operatorów nowoczesne liczniki energii elektrycznej umożliwiają pomiar również energii biernej. Warto zaznaczyć, że liczniki oferujące wspomniane funkcje nie są stosowane już tylko u odbiorców przemysłowych, ale również u odbiorców indywidualnych. Zwłaszcza gdy tak popularne staje się dołączanie do sieci elektroenergetycznej kolejnych instalacji fotowoltaicznych.

Mając na względzie podpisane umowy i często pod groźbą kar finansowych, odbiorcy są zobligowani do utrzymywania współczynnika mocy (dla przypomnienia rozumiany jako efektywność przekazywania energii ze źródła do odbiornika, na który wpływ mają składniki mocy nieaktywnej, w tym moc bierna) na odpowiednim poziomie.

Na podstawie ustawy Prawo energetyczne wydane przez Ministra Gospodarki rozporządzenie w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego precyzuje parametry jakościowe, które powinny być spełnione przez dostawcę energii dla różnych tzw. grup przyłączeniowych. Wśród tych parametrów należy wymienić częstotliwość sieci, wartość skuteczną napięcia, współczynnik zawartości harmonicznych (THD) i dopuszczalne poziomy poszczególnych harmonicznych napięcia. Jednak dostawca nie musi tych wymogów spełnić, jeśli odbiorca energii nie zapewnia wartości współczynnika $\text{tg}\varphi$ poniżej 0,4 (wartość umowna, która może być zmieniona w umowie między dostawcą a odbiorcą energii) i/lub przekracza uzgodniony poziom pobieranej mocy czynnej.

Współczynnik $\text{tg}\varphi$ zakorzenił się głęboko w polskim prawodawstwie energetycznym i definiuje się go jako stosunek naliczonej energii biernej do energii czynnej w danym okresie rozliczeniowym. Nawiązując do trójkąta mocy (rysunek nr 1), w układach sinusoidalnych łatwo zauważyć, że tangens kąta przesunięcia fazowego między prądem a napięciem jest równy stosunkowi mocy biernej Q do mocy czynnej P . Tak więc kryterium utrzymywania $\text{tg}\varphi$ poniżej 0,4 oznacza nic innego tylko ustalenie, że maksymalny poziom naliczonej energii biernej nie może być wyższy niż 0,4 wartości naliczonej energii czynnej. Każdy ponadumowny pobór energii biernej podlega dodatkowej opłacie, co z kolei reguluje rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną.

Mając na uwadze opisane wcześniej aspekty związane z obniżeniem współczynnika mocy, na który wpływ mają wszystkie składniki mocy nieaktywnej, a nie tylko moc bierna, zasadnym staje się pytanie dotyczące rzeczywistego obrazu efektywności przesyłania energii obliczanego za pomocą współczynnika $\text{tg}\varphi$. Obecne przepisy niestety nie dają innego wyboru, tak więc poprawny pomiar mocy biernej wydaje się kluczową sprawą. Czy zatem wobec przedstawionych kontrowersji wobec definicji mocy biernej liczniki tej energii zapewniają właściwe odczyty? W celu uzyskania odpowiedzi można poddać analizie normy przedmiotowe dotyczące takich liczników, jak przykładowo IEC 62053-23. Wspomniana norma nie zawiera jakichkolwiek odniesień do pomiarów w warunkach niesinusoidalnych – formuły obliczeniowe odnoszą się do sytuacji sinusoidalnych (w normie możemy przeczytać, że z powodów „praktycznych” ograniczono się wyłącznie do przebiegów sinusoidalnych). Nie ma podanej w niej żadnych kryteriów badań, które pozwoliłyby na zbadanie właściwości licznika przy odkształconych przebiegach napięć i prądów.

Obecna sytuacja pozostawia konstruktorom liczników dowolność wyboru metody pomiarowej, co niestety prowadzi do znacznych różnic wskazań energii biernej w obecności dużego poziomu zniekształceń harmonicznych. Liczniki starszego typu, czyli elektromechaniczne, posiadają charakterystykę podobną do filtra dolnoprzepustowego – wyższe harmoniczne są w nich tłumione, przez co pomiar mocy biernej w obecności harmonicznych jest bardzo bliski wartości mocy biernej składowej podstawowej. Z kolei, coraz powszechniejsze liczniki elektroniczne mogą przeprowadzać pomiar różnymi metodami. Dla przykładu mogą mierzyć moc czynną i moc pozorną, a moc bierną wyliczać z trójkąta mocy (pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów obu tych mocy – patrz równanie 8). Tak naprawdę więc, w świetle standardu IEEE 1459-2010, mierzą one moc nieaktywną a nie bierną. Inny producent może zastosować metodę z przesunięciem przebiegu napięcia o 90° , co daje wynik zbliżony do mocy biernej składowej podstawowej.

Należy pamiętać, że im większa zawartość harmonicznych, tym większe będą różnice w odczytach, no i oczywiście w konsekwencji inne będą opłaty za naliczoną energię.

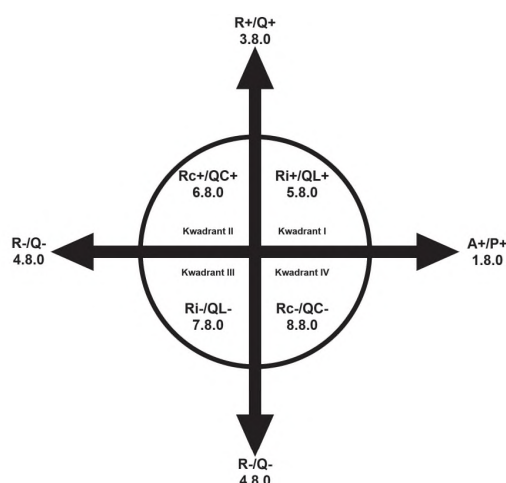
Jak to zostało wcześniej zasygnalizowane, pomiar mocy

bierniej w układach 3-przewodowych nie zrównoważonych za pomocą tradycyjnych liczników jest obciążony dodatkowym błędem, spowodowanym wytworzeniem wewnątrz licznika wirtualnego zera, mającego niewiele wspólnego z rzeczywistym zerem odbiornika.

Na domiar złego producenci zwykle nie podają żadnych informacji na temat zastosowanej metody pomiarowej.

Pozostaje tylko z niecierpliwością czekać na kolejną wersję normy, która zdefiniuje w dużo bardziej precyzyjny sposób metodę pomiarową i sposób badania także w warunkach niesinusoidalnych.

Powszechnie stosowany jest w energetyce podział energii bierniej na cztery niezależne składowe, z których każda zliczana jest osobno. Określane jako tzw. kwadranty, podział ten bazuje na znakach mocy czynnej i bierniej, tak jak przedstawia to rysunek nr 5.



Rysunek 5 – Podział czterokwadrantowy przepływu mocy i energii.

Kwadrant I (oznaczenie „ R_i+/Q_L+ ”): występuje pobór energii czynnej (moc czynna jest dodatnia), występuje pobór energii bierniej (moc bierna jest dodatnia). W takich warunkach charakter obciążenia jest indukcyjny.

Kwadrant II (oznaczenie „ R_c+/Q_C+ ”): występuje oddawanie energii czynnej (moc czynna jest ujemna), występuje pobór energii bierniej (moc bierna jest dodatnia). Charakter obciążenia jest pojemnościowy.

Kwadrant III (oznaczenie „ R_i-/Q_L- ”): występuje oddawanie energii czynnej (moc czynna jest ujemna), występuje oddawanie energii bierniej (moc bierna jest ujemna). W takich warunkach charakter obciążenia jest indukcyjny.

Kwadrant IV (oznaczenie „ R_c-/Q_C- ”): występuje pobór energii czynnej (moc czynna jest dodatnia), występuje oddawanie energii bierniej (moc bierna jest ujemna). Charakter obciążenia jest pojemnościowy.

Znaki plus i minus w oznaczeniach kwadrantów wskazują znak mocy bierniej.

Podany podział pozwala na zbudowanie liczników energii bierniej, które zwiększają swój stan jedynie wtedy, gdy przepływ energii odbywa się w danym kwadrancie. Oznacza to jednocześnie, że w danym momencie tylko jeden z liczników może zwiększać swój stan.

W typowym przypadku dostarczania energii do odbiornika praca odbywa się w dwóch kwadrantach: I ($L+$) i IV ($C+$). Wyliczone wartości tangensów mogą być podstawą do naliczenia ewentualnych kar za ponadumowny pobór energii bierniej. W przypadku kwadranta I ($L+$) typową wartością graniczną, powyżej której są naliczane opłaty, jest 0,4. W przypadku kwadranta IV ($C+$) często jakkolwiek pobór energii bierniej jest podstawą do naliczenia kar. Wynika z tego również praktyczny wniosek, że najbardziej opłacalna (z punktu widzenia odbiorcy) jest praca w kwadrancie pierwszym ($L+$) w zakresie $\text{tg}\phi$ ($L+$) między 0 a 0,4.

Kontrolowanie poziomu pobieranej mocy bierniej stanowi element racjonalnego gospodarowania energią elektryczną – temat ten zostanie rozwinięty w kolejnym wydaniu.

dr inż. Jakub Grela

Kanlux

Tuby led Kanlux T8 GLASS v4

- mleczny, szklany korpus,
- równomiernie emitują światło
- **3 lata gwarancji**
- skuteczność świetlna do **160 lumenów z Wata**



25 000 h



250°

600, 1200, 1500 mm