



prof. dr hab. inż. Leszek S. CZARNECKI

Life Fellow IEEE, Alfredo M. Lopez Distinguished Professor, Louisiana State University, USA,

e-mail: lsczar@cox.net

s. 20–28

Esej o kłopotach elektryków z fizyką

Essay On Troubles of Electrical Engineers with Physics

Abstract: This Essay shows that, although electrical engineering has emanated from physics, nonetheless it is sometimes with this physics in conflict. Some properties of electrical circuits are from the physics perspective erroneously interpreted or thought that some objects exist physically. It refers to some electrical powers and harmonic components. There are even some alleged physical phenomena. This conflict of electrical engineering with physics is subjective, however, an electrical engineer can understand and interpret physical properties of electrical circuits in his own way.

Streszczenie: Ten esej pokazuje, że jakkolwiek elektrotechnika jest technologicznie zorientowaną emanacją fizyki, to pozostaje niekiedy z tą fizyką w konflikcie. Pewne właściwości obwodów elektrycznych bywają z perspektywy fizyki błędnie interpretowane lub też pewnym obiektom przypisuje się istnienie fizyczne. Dotyczy to pewnych mocy elektrycznych oraz składowych harmonicznnych. W przekonaniu pewnych elektryków istnieją nawet zjawiska fizyczne, które w istocie są jedynie domniemane. Ten konflikt elektrotechniki z fizyką ma oczywiście charakter subiektywny, każdy elektryk może rozumieć fizyczne cechy obwodu w sposób odmienny.

Keywords: physical properties, conflict, physical phenomena, harmonic components

Słowa kluczowe: fizyczne cechy obwodu, konflikt elektrotechniki, składowe harmoniczne

1. WSTĘP

Chwila zastanowienia się nad przedmiotem tego eseju wystarczy do wyciągnięcia wniosku, że te "kłopoty" są zapewne subiektywne. Moje kłopoty z fizyką nie muszą być kłopotami innego kolegi elektryka. Każdy z nas może inaczej interpretować zjawiska fizyczne, czy mieć odmienny pogląd odnośnie tego, co możemy traktować jako obiekty fizyczne, i to nawet nie na poziomie kwantowym, gdzie sami fizycy wydają się mieć rozbieżności interpretacyjne. Elektrotechnika, której jako elektrycy jesteśmy produktem, opiera się na fizyce klasycznej.

Z uwagi na tę subiektywną naturę tych kłopotów z fizyką, esej ten nie będzie pisany w formie bezosobowej, mogącej dotyczyć wszystkich kolegów elektryków, lecz raczej z mojego punktu widzenia, w oparciu o moje osobiste w tej materii obserwacje, doświadczenia i przemyślenia.

Przykładem pokazującym zasadność przedmiotu tego eseju jest tytuł jednego z czołowych czasopism w energetyce, IEEE Transactions on Power Delivery. Z perspektywy fizyki tytuł ten nie jest poprawny, gdyż systemy energetyczne nie dostarczają do odbiorników mocy (*ang.* power delivery), lecz energię. Moc jest prędkością przepływu energii i nie prędkość ta, lecz energia jest do odbiorników dostarczana.

Ten brak precyzji w tytule "Transactions" bywa traktowany z lekceważeniem, jako pewien inżynierski żargon. I tak może jest. Z powodu przestawienia terminów „energia” i „moc” nikt nie umrze. To tylko w medycynie brak precyzji w nazwach mógłby mieć skutki fatalne. Niestety, widoczny niekiedy w elektrotechnice brak precyzji odnośnie do pojęć fizycznych nie jest jej głównym problemem. Elektrotechnika wyewoluowała z fizyki, która tworzy jej podstawy. Zgodność z fizyką jest gwarantem jej poprawności. Dlatego każda rozbieżność elektrotechniki z fizyką winna być uważnie obserwowana i sygnalizowana. Może być ona źródłem błędów. Esey ten pokazuje kilka takich sytuacji.

2. FIZYKA A TEORIA MOCY

Historia przeszło sto lat trwających badań nad rozwojem teorii mocy obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi, jest bardzo dobrym przykładem kłopotów elektryków z fizyką. Badania te, zainicjowane w 1892 roku obserwacją Steinmetza [1], że w obwodzie z lampą łukową, moc czynna P , moc bierna Q oraz moc pozorna S nie spełniają równania mocy

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

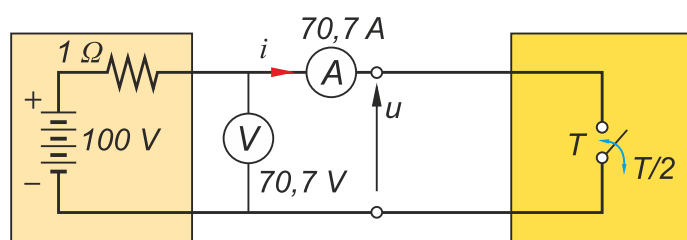
doprowadziły do powstania dziewięciu różnych Szkół Teorii Mocy, które w sposób wzajemnie odmienny, często wzajemnie sprzeczny, definiują moce i opisują właściwości energetyczne obwodów elektrycznych. Szkoły te, identyfikowane są poprzez nazwiska ich twórców, mianowicie, Budeanu [2], Fryze [3] Shepherd i Zakikhani [4], Kusters i Moore [5], Nabay i Akagi [6], Depenbrock [7], Tenti [8], i Czarnecki [9], [10]. Większość z nich została wyróżniona za wkład w teorię mocy, najwyższym stopniem honorowym Fellow IEEE. Niestety, jak to zostało wykazane w kilku artykułach autora tego eseju [11], [12], [13], [14], [15] i w książce [10], teorie te błędnie opisują właściwości energetyczne obwodów elektrycznych. Co jest jednak zaskakujące, *wszystkie te teorie są matematycznie poprawne, a jednocześnie błędnie opisują lub interpretują zjawiska fizyczne towarzyszące przenoszeniu energii w obwodach elektrycznych.*

O tym, jak bardzo zawikłane są zjawiska fizyczne i ich interpretacja może świadczyć następujący epizod rozwoju teorii mocy. W roku 1927 Budeanu wprowadził [2] koncepcję mocy biernej Q_B i mocy odkształcenia D . Koncepcje te przez kilka dekad funkcjonowały w teorii mocy i znalazły się w Standardzie IEEE [16]. Dopiero po 60-ciu latach od wprowadzenia tej teorii mocy, pokazałem [11], że nie istnieje w obwodzie elektrycznym żadne zjawisko opisywane ilościowo mocą bierną Budeanu Q_B oraz że nie istnieje żadne zjawisko opisywane mocą odkształcenia D . Moce te były przedmiotem ostrej krytyki Prof. Fryzego [3], nestora polskiej elektrotechniki i Członka Honorowego Polskiego Towarzystwa Fizycznego. *Dlatego, dla autora tego eseju było olbrzymim zaskoczeniem, że w swoim ostatnim, już pośmiertnie opublikowanym artykule [17], Prof. Fryze zaproponował nowe, matematycznie odmienne, lecz identyczne co do sensu definicje mocy biernej Q_B i mocy odkształcenia D , nie dostrzegając, że nie ma w obwodach elektrycznych żadnych zjawisk fizycznych związanych z tymi dwiema mocami.*

Właściwości energetyczne obwodów zostały stowarzyszone ze zjawiskami fizycznymi w obwodach elektrycznych, zarówno jedno- jak i trójfazowych z prądami niesinusoidalnymi, dopiero w ramach teorii mocy opartej na koncepcji Składowych Fizycznych Prądów, znanej pod angielską nazwą Currents' Physical Components (CPC), przedstawionej w całości w artykule [9] i książce [10].

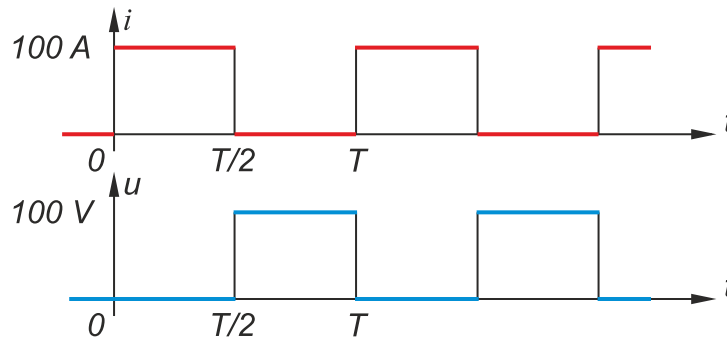
3. FIZYKA A SKŁADOWE HARMONICZNE

Szeregi Fouriera i składowe harmoniczne są jednym z głównych matematycznych narzędzi pozwalających na analizę obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi. Powszechnie dostępne są mierniki składowych harmonicznych prądów i napięć w systemach energetycznych, czy standardy dopuszczalnej ich zawartości w napięciu zasilania. Budowane są filtry pozwalające redukować ich zawartość. Od 1984 roku organizowane są spotkania naukowe o nazwie International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHPS). Dlatego wydaje się, że składowe harmoniczne traktowane są powszechnie w środowisku inżynierów elektryków jako obiekty istniejące fizycznie w systemach energetycznych. Tymczasem już w roku 1931 Prof. Fryze dostrzegł, że harmoniczne fizycznie istnieć nie mogą. Aby to pokazać, posłużył się obwodem, pokazanym na rysunku 1. W obwodzie tym, zasilanym ze źródła prądu stałego, odbiornikiem jest przełącznik, przełączany z okresem T , pozostający w połowie okresu T w stanie zamkniętym, a w pozostałej połowie okresu przełącznik jest otwarty.



Rys. 1. Obwód z rotacyjnym przełącznikiem
Fig. 1. Circuit with a rotary switch

Przebiegi prądu i napięcia przełącznika pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi prądu i napięcia przełącznika w obwodzie pokazanym na rysunku 1

Fig. 2. Current/voltage waveforms for a switch in circuit shown in Fig. 1

Przebiegi te mają szeregi Fouriera, które mogą być przedstawione w postaci sumy harmonicznych

$$u(t) = U_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n, \quad (2)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_1 t + \beta_n) = \sum_{n=0}^{\infty} i_n. \quad (3)$$

Pojedyncza, niezerowa harmoniczna prądu przełącznika

$$i_n(t) = \sqrt{2} I_n \cos(n\omega_1 t + \beta_n), \quad (4)$$

jest wielkością ciągłą od $-\infty$ do $+\infty$. Nie może zatem istnieć w stanie otwartym przełącznika, to jest wtedy, gdy jego prąd $i(t)$ ma wartość zerową. Podobnie jest z niezerową harmoniczną napięcia na przełączniku

$$u_n(t) = \sqrt{2} U_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n). \quad (5)$$

Nie może ona istnieć w stanie zamkniętym przełącznika wtedy, gdy napięcie na nim $u(t)$ ma wartość zerową. Oznacza to, że harmoniczne nie są obiektami fizycznymi, to znaczy fizycznie istniejącymi w prądzie i napięciu. Są one jedynie obiektami matematycznymi, pozwalającymi analitycznie opisywać i aproksymować przebiegi okresowe.

Niestety, wydaje się, że ta obserwacja Prof. Fryzego nie przedarła się do świadomości elektryków, traktujących składowe harmoniczne jako obiekty fizyczne. Przykładem tego może być artykuł [18] Prof. Emanuela, który przyczynę obniżania się wartości współczynnika mocy, $\lambda = P/S$, widzi w oscylacjach energii między odbiornikiem a źródłem zasilania, spowodowanych harmonicznymi prądu i napięcia. Rzeczywiście, zgodnie z rozumowaniem przedstawionym w [18], w obecności harmonicznych $i_n(t)$ oraz $u_n(t)$ w prądzie i napięciu, moc chwilowa odbiornika, to jest prędkość przepływu energii $W(t)$ ze źródła do odbiornika

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t) i(t), \quad (6)$$

ma składnik oscylacyjny

$$p_n(t) = u_n(t) i_n(t). \quad (7)$$

Ten składnik istnieje fizycznie jednak tylko wtedy, gdy harmoniczne $u_n(t)$ oraz $i_n(t)$ istnieją fizycznie. Ponieważ fizycznie istnieć one nie mogą, nie mogą zatem istnieć związane z nimi oscylacje energii. Zauważmy ponadto, że jeśli harmoniczne fizycznie istnieją, to moc chwilowa jest nieskończoną sumą składowych oscylacyjnych, mianowicie

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t) i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(t) \sum_{n=0}^{\infty} i_n(t) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k(t). \quad (8)$$

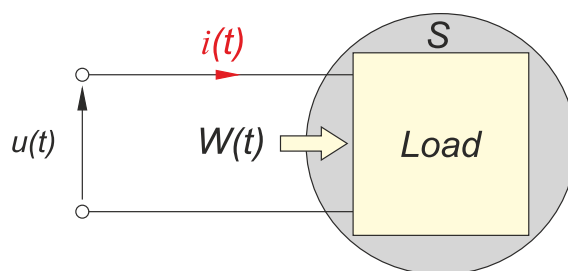
Ponieważ jednak tylko jedna z wielkości na przełączniku, prąd lub napięcie, może mieć wartość różną od zera, zatem, pomijając punkty nieciągłości prądu i napięcia, moc chwilowa przełącznika jest stale równa zero, gdyż

$$p(t) = u(t) i(t) \equiv 0 . \quad (9)$$

Nie ma więc żadnych oscylacji energii, co nie jest takie oczywiste wtedy, gdy uzna się fizyczne istnienie składowych harmoniczych.

4. FIZYKA A MOC BIERNA

Ze spotkań autora tego eseju ze środowiskami inżynierskimi i naukowymi w różnych krajach wynikała obserwacja, że dominująca część tego środowiska kojarzy moc bierną Q z oscylacjami energii między odbiornikiem a źródłem zasilania. To przekonanie może wynikać stąd, że w liniowym obwodzie jedno-fazowym, pokazanym na rysunku 3,



Rys. 3. Obwód jednofazowy

Fig. 3. Single-phase circuit

zasilanym napięciem sinusoidalnym, a więc i sinusoidalnym prądem

$$u(t) = \sqrt{2} U \cos \omega t , \quad i(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \varphi) , \quad (10)$$

moc chwilowa

$$p(t) = u(t) i(t) = 2 UI \cos \omega t \cos(\omega t - \varphi) = p_u(t) + p_b(t) , \quad (11)$$

ma składnik oscylacyjny

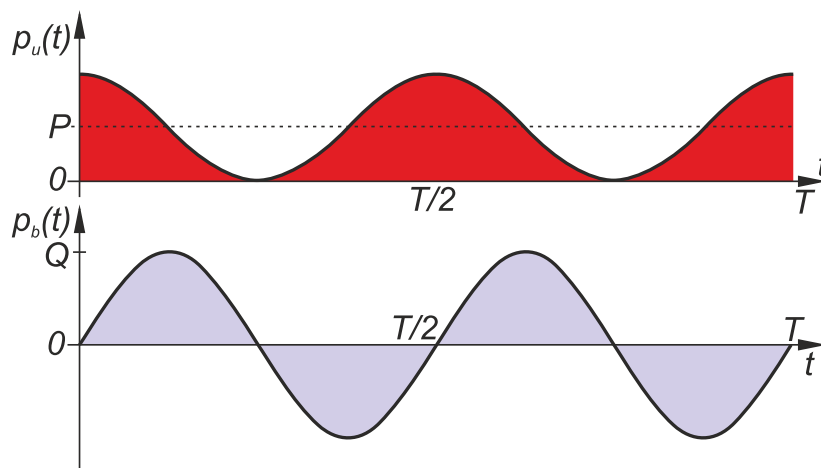
$$p_b(t) = Q \sin 2\omega t . \quad (12)$$

Pozostały składnik:

$$p_u(t) = P(1 + \cos 2\omega t) \quad (13)$$

jest nieujemny i reprezentuje jednokierunkowy przepływ energii. Ich przebieg pokazany jest na rysunku 4.

Amplituda składnika oscylacyjnego mocy chwilowej w takim obwodzie jest równa mocy biernej Q .



Rys. 4. Składowe mocy chwilowej odbiornika jednofazowego z sinusoidalnym napięciem zasilania i sinusoidalnym prądem

Fig. 4. Components of instantaneous power of single-phase load with sinusoidal supply voltage and sinusoidal current

Niestety, ta właściwość obwodów jednofazowych uwiodła elektryków, gdyż nie dostrzegli, że takiej właściwości nie mają już obwody trójfazowe. Obwód trójfazowy, pokazany na rysunku 3, jeśli jest on liniowy, zrównoważony i zasilany napięciem sinusoidalnym

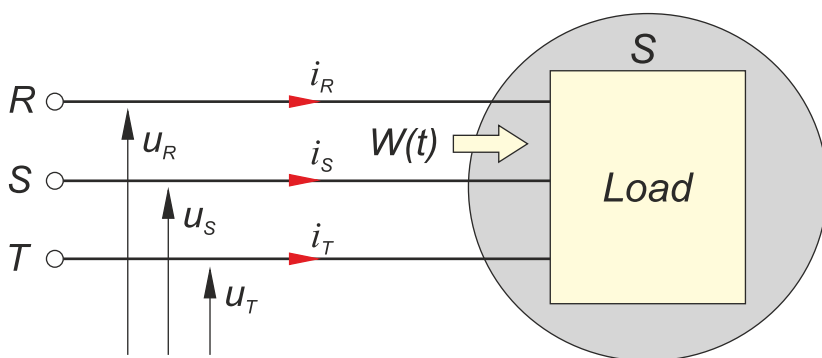


Fig. 5. Odbiornik trójfazowy

Fig. 5. Three-phase load

ma moc chwilową

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = u_R(t)i_R(t) + u_S(t)i_S(t) + u_T(t)i_T(t) = 3UI \cos \varphi = P, \quad (14)$$

która ma wartość stałą, niezależną od jego mocy bierniej Q . Nie ma w takim obwodzie żadnych oscylacji energii między źródłem zasilania a odbiornikiem, które mogłyby wyjaśniać istnienie mocy bierniej Q . Przyczyną jej istnienia w obwodach liniowych jest wyłącznie przesunięcie fazowe prądu odbiornika względem napięcia zasilania, nie zaś domniemane oscylacje energii.

Jakkolwiek moc bierna pojawia się z powodu przesunięcia fazowego prądu względem napięcia, jednak tego zjawiska nie opisuje, jest tylko jego efektem. [Przesunięcie to może być powodowane gromadzeniem energii w polach elektrycznych lub magnetycznych, a więc w obwodach rezystancyjno-reaktancyjnych. Może się też pojawiać w obwodach czysto rezystancyjnych o parametrach okresowo zmiennych.](#) Oznacza to, że moc bierna Q nie ma swego udziału w opisie zjawisk fizycznych w obwodach elektrycznych.

5. FIZYKA A BILANS MOCY

Zasada bilansu mocy jest bardzo użytecznym narzędziem w energetycznej analizie obwodów elektrycznych, służącym do weryfikacji jej wyników. Zasada ta dotyczy mocy czynnej P i mocy bierniej Q , nie spełnia jej natomiast moc pozorna S . Jest także zasadą, którą używa się w debatach nad fizycznym charakterem pewnych wielkości energetycznych, w szczególności mocy czynnej P , mocy bierniej Q , mocy bierniej według definicji Budeanu Q_B , czy reaktancyjnej mocy bierniej Q_r , według definicji Tenti'ego [8]. W przypadku tej ostatniej, spełnianie zasady bilansu zostało nawet podkreślone w nazwie teorii mocy, zaproponowanej przez Prof. Tenti'ego, mianowicie „Conservative Power Theory (CPT)”, sugerując tym, że wprowadzona w tej teorii reaktancyjna moc bierna Q_r jest wielością fizyczną. Może być jednak rzeczą zastanawiającą, że moc bierna Budeanu Q_B , nie mająca żadnego związku z jakimkolwiek zjawiskiem fizycznym w obwodach elektrycznych, też spełnia zasadę bilansu mocy.

Niejasność odnośnie fizycznego sensu zasady bilansu mocy wynika stąd, że może być ona wnioskiem z dwóch odmiennych, bardziej podstawowych zasad, z których jedna ma sens fizyczny, a druga wyłącznie sens matematyczny. Pierwszą z nich jest Zasada Zachowania Energii i można z niej wyprowadzić zasadę bilansu mocy chwilowej $p(t)$ i mocy czynnej P . Nie da się z niej jednak wyprowadzić zasady bilansu mocy biernych, Q , Q_B , oraz Q_r . Zasadę bilansu tych trzech mocy biernych można wyprowadzić z prawa Tellegena [19], które jest tylko matematyczną, lecz nie fizyczną właściwością obwodów elektrycznych.

Zasada Zachowania Energii stwierdza, że jeśli obwód, złożony z K elementów, jest elektrycznie izolowany, to jego energia elektryczna, równa sumie energii $W_k(t)$ wszystkich elementów, jest stała, mianowicie.

$$\sum_{k=1}^K W_k(t) = \text{Const}. \quad (15)$$

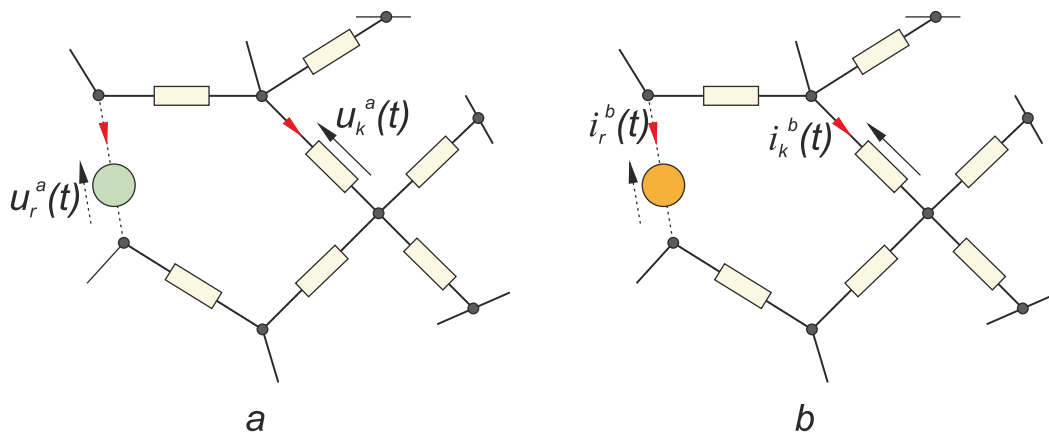
Z zasady tej wynika bezpośrednio zasada bilansu mocy chwilowej, to jest

$$\sum_{k=1}^K \frac{dW_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^K p_k(t) = 0 \quad (16)$$

oraz zasada bilansu mocy czynnej

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{T} \int_0^T p_k(t) dt = \sum_{k=1}^K P_k = 0 \quad (17)$$

Ponieważ nie są znane związki mocy biernych Q , Q_B , oraz Q_r z energią elementów elektrycznych, zatem Zasada Zachowania Energii (15) nie tworzy podstawy fizycznej dla zasady bilansu tych mocy. Można ją wyprowadzić z prawa Tellegena. Według tego prawa, jeśli dwa obwody elektryczne, zbudowane z K elementów, mają identyczną topologię, to znaczy tę samą liczbę węzłów połączonych identycznie gałęziami, tak jak to jest pokazane na rysunku 6,



Rys. 6. Dwa obwody o identycznej topologii

Fig. 6. Two circuits with identical topologies

to nawet przy całkowicie odmiennych elementach gałęzi obu obwodów, suma wszystkich K iloczynów napięć gałęziowych jednego z tych obwodów i prądów gałęziowych drugiego z nich, w każdej chwili jest równa zero, mianowicie

$$\sum_{k=1}^K u_k^a(t) i_k^b(t) \equiv 0 \quad (18)$$

Prawo to można użyć do wyprowadzenia zasady zachowania mocy biernej Q w następujący sposób. Jeśli przyjmiemy, że oba obwody co do parametrów gałęzi są identyczne, lecz przebiegi napięć i prądów źródłowych w obwodzie (b) są opóźnione o $T/4$ względem tych samych przebiegów w obwodzie (a), zatem:

$$i_k^b(t) \equiv i_k^a(t - \frac{T}{4}) \quad (19)$$

to z prawa Tellegena wynika, że

$$\sum_{k=1}^K u_k^a(t) i_k^b(t) = \sum_{k=1}^K u_k^a(t) i_k^a(t - \frac{T}{4}) = \sum_{k=1}^K u_k(t) i_k(t - \frac{T}{4}) = 0 \quad (20)$$

Moc bierna Q obwodu z sinusoidalnym napięciem i prądem definiowana jest jako

$$Q = UI \sin \varphi = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t - \frac{T}{4}) dt \quad (21)$$

zatem z prawa Tellegena wynika, że

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K u_k(t) i_k(t - \frac{T}{4}) dt = \sum_{k=1}^K \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) i_k(t - \frac{T}{4}) dt = \sum_{k=1}^K Q_k = 0 \quad (22)$$

a więc moc bierna Q spełnia zasadę bilansu. Nie jest to jednak właściwość fizyczna tej mocy, lecz tylko właściwość matematyczna. Definicja (21) mocy biernej Q nie oparta jest na żadnym zjawisku fizycznym, gdyż napięcie i prąd pod symbolem całki są obserwowane w różnych, przesuniętych o $T/4$, chwilach czasu. Iloczyn taki fizycznie nie istnieje. Istnieje on wyłącznie jako termin matematyczny.

6. DOMNIEMANE ZJAWISKA FIZYCZNE

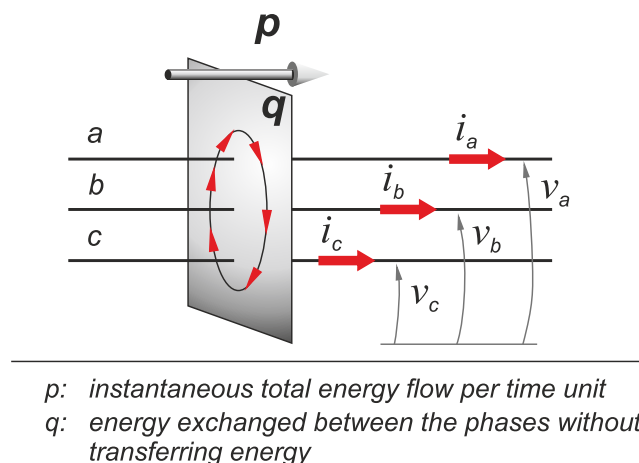
Będąc fundamentem elektrotechniki, fizyka służy do wyjaśniania jej podstaw, lecz niekiedy elektrycy nie są w stanie, tak jak to ma miejsce w teorii mocy, opisać w sensie fizycznym pewnych właściwości energetycznych obwodów elektrycznych. Czasem jest odwrotnie. Sugerują istnienie pewnych zjawisk fizycznych na poparcie swoich koncepcji. Przykładem takiej sytuacji jest debata wokół chwilowej mocy biernej q , wprowadzonej do teorii mocy w 1983 r. przez Nabae'a i Akagi'ego [6].

Według tej teorii, stan energetyczny odbiornika z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia można opisać za pomocą dwóch mocy chwilowych, p i q . Pierwsza z nich jest dobrze znaną mocą chwilową $p(t)$, czyli prędkością przepływu energii $W(t)$, jedynie używaną w ramach tej teorii pod nową nazwą, mianowicie „chwilowej mocy czynnej”. Druga z nich jest właśnie chwilową mocą bierną q . Niestety, autorzy tej teorii mocy nie wyjaśnili czym jest ta moc w sensie fizycznym. Zapoczątkowało to dość długo trwającą dyskusję naukową. Wreszcie, w 2007 r., jeden z twórców tej teorii, Prof. Akagi, Prezydent IEEE Power Electronics Society, podał fizyczną interpretację chwilowej mocy biernej q w książce [20]. W oryginale ta interpretacja brzmi następująco:

“...the imaginary power q is proportional to the quantity of energy that is being exchanged between the phases of the system...” “Figure...” “summarizes the above explanations about the real and imaginary powers.”

W polskim tłumaczeniu, interpretacja ta ma postać:

*“....moc urojona q jest proporcjonalna do ilości energii wymienianej między fazami systemu...”
“Rysunek ... podsumowuje powyższe wyjaśnienie dotyczące mocy czynnej i urojonej”.*



Physical meaning of the instantaneous active and reactive powers.

Rys. 7. Oryginalna interpretacja chwilowej mocy biernej q wraz z rysunkiem przedstawionym w [20]

Fig. 7. Original interpretation of instantaneous reactive power q , drawing is from reference [20]

Rysunek, wraz z podpisem pokazany jest na rysunku 7. Aby nie było dwuznaczności, trzeba wyjaśnić, że w teorii Akagi'ego przymiotnik "imaginary" używany jest wymiennie z przymiotnikiem "reactive". Podobnie jest z przymiotnikami "real" i "active".

Według Akagi'ego interpretacja ta jest do tego stopnia przekonująca, że fragmenty rysunku 7 z wirującą mocą q zostały użyte jako dekoracja okładki książki [20]. Niestety, interpretacja ta jest błędna. Energia może przepływać wyłącznie w kierunku prostopadłym do wektora natężenia pola magnetycznego H , wytworzonego przez prąd, który jest przyczyną przepływu tej energii. Ponieważ pole magnetyczne wiruje wokół prądów w przewodach zasilających, nie może być zjawiska wirowania, jak sugeruje to rysunek, ani energii, ani związanej z nią chwilowej mocy biernej (urojonej) q . To wirowanie jest jedynie domniemanym zjawiskiem fizycznym.

Innym domniemanym zjawiskiem fizycznym są fale elektromagnetyczne użyte do przenoszenia energii w systemach energetycznych. Zjawisko to opisywane jest w Internecie, który jest obecnie znaczącym źródłem informacji. Krąży w nim filmik YouTube, uwiarygodniony przez dwóch profesorów energetyki, pokazujący bardzo sugestywnie, jak w systemach energetycznych fale elektromagnetyczne umożliwiają przenoszenie energii ze źródeł do odbiorników.

Oczywiście, w systemach energetycznych istnieją fizycznie fale elektromagnetyczne. Ich długość falowa λ w liniach napowietrznych przy częstotliwości 50 Hz wynosi $\lambda = 6000$ km. Ponieważ linie nie są zwykle impedancyjnie dopasowane do odbiorników, powstają w nich elektromagnetyczne fale stojące, obserwowane jako nieakceptowalne zmiany wartości skutecznej napięcia i prądu wzdłuż linii. Linie transmisyjne są zwykle znacznie krótsze od długości falowej λ . Efekty falowe są coraz bardziej obserwowalne wtedy, gdy długość linii zbliża się do $\lambda/4$. Aby zredukować zjawiska falowe, buduje się wzdłuż linii stacje kompensacyjne, jednak ze wzrostem długości linii kompensacja zjawisk falowych staje się nieskuteczna i zbyt droga. Rezygnuje się wtedy z przesyłu energii prądem zmiennym na rzecz przesyłu prądem stałym. Mianowicie, aby uniknąć w długich liniach przesyłowych zjawisk falowych, energię przesyła się liniami znanymi pod akronimem HVDC (*ang.* High Voltage DC) lines. Nie jest więc prawdą, że fale elektromagnetyczne służą do przesyłu energii w systemach energetycznych. Fale te szkodzą temu przesyłowi. Przesyłanie energii elektrycznej w systemach energetycznych falami elektromagnetycznymi jest rodzajem domniemanego, w sensie przesyłania energii, zjawiskiem fizycznym, jakkolwiek fale te w systemach energetycznych, chociaż jako szkodliwe, oczywiście fizycznie istnieją.

7. ZAKOŃCZENIE

Esej ten pokazuje, że elektrycy mogą mieć pewne kłopoty z fizyką i podaje kilka przykładów takich kłopotów i ich przyczyn. Ponieważ, jak zaznaczono we wstępie tego eseju, kłopoty te mogą mieć charakter subiektywny i przedstawiam w nim swoje, osobiste w tej materii doświadczenia i obserwacje, można więc ten esej uzupełnić informacją, że jestem absolwentem Technikum Budownictwa Przemysłowego, w Lublinie, w którego programie nauczania, przedmiotu o nazwie „Fizyka” nie było. Dzięki temu, potencjalnych konfliktów z fizyką szczęśliwie uniknąłem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ch.P. Steinmetz: "Is a phase-shift in the current of an electric arc?", (in German), *Elektrotechnische Zeitschrift*, Heft 42, 567-568, 1892.
- [2] C.I. Budeanu: "Puissances reactives et fictives", *Institut Romain de l'Energie*, Bucharest, 1927.
- [3] S. Fryze: "Active, reactive and apparent powers in systems with distorted waveform", (in Polish) *Przegląd Elektrotechniczny*, Z. 7, 193-203, 1931; Z. 8, 225-234, Z. 22, 673-676, 1932.
- [4] W. Shepherd, P. Zakikhani: "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems", *Proc. IEE*, Vol. 119, No. 9, 1361-1362, 1972.
- [5] N.L. Kusters, W.J.M. Moore: "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions", *IEEE Trans. Pow. Appl. Syst.*, Vol. PAS-99, 1845-1854, 1980.
- [6] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae: "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", *Proc. IEEE-IPEC*, Tokyo, 1375-1380, 1983.
- [7] M. Depenbrock: "The FBD-method, a generalized applicable tool for analyzing power relations", *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, 381-387, 1987.
- [8] P. Tenti, P. Mattavelli: "A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions", *Proc. of the Six Int. Workshop on Power Definitions and Measurement Under Nonsinusoidal Conditions*, Milano, 2003.
- [9] L.S. Czarnecki: "Currents' Physical Components (CPC)-based Power Theory. A Review, Part I: Power Properties of Electrical Circuits and Systems", *Przegląd Elektrotechniczny*, R95, No. 10, 1-11, 2019.
- [10] L.S. Czarnecki: "Powers and Compensation in Circuits with Nonsinusoidal Current.", *Oxford University Press*, 2024.
- [11] L.S. Czarnecki: "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned", *IEEE Trans. IM*, Vol. IM-36, No. 3, 834-837, 1987.
- [12] L.S. Czarnecki: "Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents", *Archiv fur Elektr.*, (81), No. 2, 5-15, 1997.

- [13] L.S. Czarnecki: "Additional discussion to "Reactive power under nonsinusoidal conditions", *IEEE Trans. on Power and Systems*, Vol. PAS-102, No. 4, 1023-1024, 1983.
- [14] L.S. Czarnecki: "On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, 828-836, 2004.
- [15] L.S. Czarnecki: "Comparison of the Conservative Power Theory (CPT) with Budeanu's power theory", *Annales of the University of Craiova*, 51-59, 2016
- [16] *IEEE*, The New Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, 1997.
- [17] S. Fryze: "Theoretical and physical fundamentals for the active, reactive and apparent power definitions in multi-phase systems with distorted voltages and currents", (in Polish), *Scientific Letters of Gliwice Univ. of Techn., Elektryka*, No. 100, 29-46, posthumous publication, 1985.
- [18] A.E. Emanuel: "Powers in nonsinusoidal situations. A review of definitions and physical meanings", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, 1377-1389, 1990.
- [19] B.D.H. Tellegen: "A general network theorem with applications", *Philips Research Reports*, (Philips Research Laboratories) 7, 259-269, 1952.
- [20] H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes: "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning.", *IEEE Press*, 2007.

otrzymano / received: 21.02.2024 przyjęto do publikacji / accepted: 14.03.2022

Artykuł recenzowany / peer-reviewed article

Coroczne ogólnopolskie spotkanie o charakterze szkoleniowym
jest źródłem najnowszej wiedzy technicznej

AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA

Konferencja naukowo-techniczna

INFOTECH®

- OCHRONA PRZECIWPORAŻENIOWA
- UZIOMY FUNDAMENTOWE
- LINIE KABLOWE SN I WN
- NOWOCZESNE NAPĘDY
- ZABEZPIECZENIA
- JAKOŚĆ ENERGII
- MAGAZYNOWANIE ENERGII
- SMART GRID

Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Gdańsk

sfederowane w Pomorskiej FSNT NOT w Gdańsku



Oferujemy:

szkolenia podnoszące kwalifikacje
egzaminy na uprawnienia "E" i "D"
rekomendacje i ekspertyzy

Ponadto:

organizujemy targi i konferencje

SEP Oddział Gdańsk
ul. Rajska 6 p. 325
80-950 Gdańsk

www.sep.gda.pl
tel./fax. 58 301 49 24
e-mail: sep@sep.gda.pl

Miejsce na Twoją reklamę

ZAMÓW PRENUMERATĘ I CZYTAJ!

MIESIĘCZNIK STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH



redinpe

INFORMACJE O NORMACH
I PRZEPISACH
ELEKTRYCZNYCH

ODZNACZONY m.in. ŻŁOTĄ ODZNAKĄ HONOROWĄ SEP

Założony w 1994 r. przez Zarząd Główny SEP

DODATEK DO MIESIĘCZNIKA „INPE” SEP



redinpe

PODRĘCZNIK
DLA ELEKTRYKÓW
ZESZYTY MONOTEMATYCZNE

ODZNACZONY m.in. ŻŁOTĄ ODZNAKĄ HONOROWĄ SEP

Ukazuje się w cyklu 2- lub 3-miesięcznym

- Zadbaj o poziom swej wiedzy technicznej
- Zatrzymaj jej deprecjację wobec postępu technicznego i zmian przepisów

Redakcja i Wydawca: SEP – COSiW Zakład Wydawniczy INPE
ul. Czapliniecka 44, 97-400 Bełchatów, tel./fax 44 633 33 55
e-mail: redinpe@neostrada.pl

Adres dla korespondencji: ul. Kalinowa 5, 97-400 Bełchatów, fax 44 635 02 02

www.redinpe.com