

Yokogawa PX8000

Oscyloskop do pomiarów mocy i obwodów zasilania, część 1 – przegląd rozwiązań i przyrządów do pomiarów mocy i obwodów zasilania

Firma Yokogawa znana jest użytkownikom na całym świecie jako producent przyrządów pomiarowych o unikatowych cechach funkcjonalnych, precyzji i pięknym designie. W wielu przypadkach trudno byłoby zastąpić urządzenia Yokogawy innymi. W pierwszej części artykułu dokonano krótkiego przeglądu oferty.

Zanim przejdziemy do omówienia specyficznego oscyloskopu, jakim jest PX8000 omawiamy kilka zagadnień teoretycznych związanych z pomiarami mocy.

Moc elektryczna – definicje, pojęcia

Definicja mocy dla prądu stałego (DC) jest prosta, wszyscy ją doskonale pamiętamy. Moc jest to iloczyn napięcia i prądu:

$$P = U \cdot I$$

Często korzystamy z tego wzoru w odniesieniu do rezystancji odbiornika energii R, przybiera on wówczas postać:

$$P = I^2 \cdot R$$

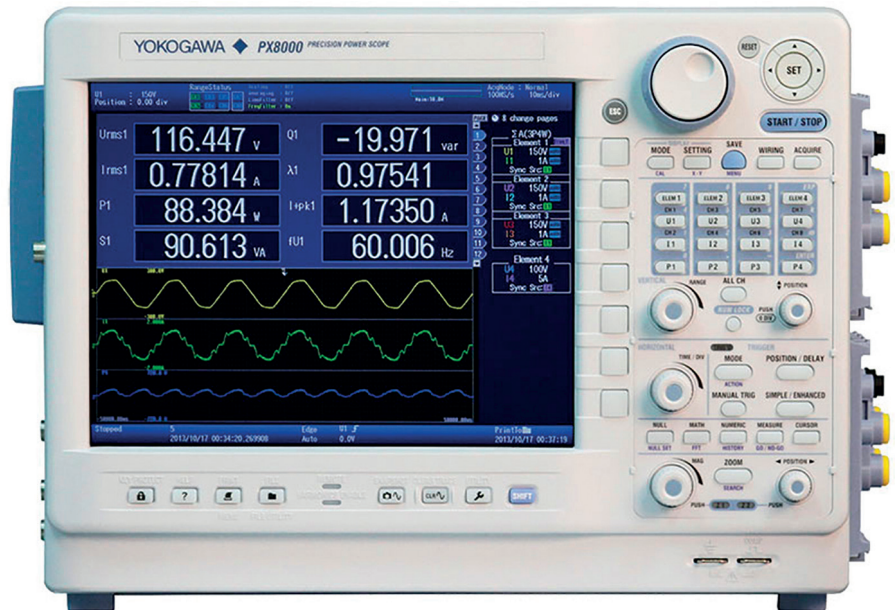
lub

$$P = U^2 / R$$

Sytuacja nieco się komplikuje, gdy mamy do czynienia z prądem zmiennym (AC). Jeżeli prąd jest w fazie z napięciem definicja pozostaje względnie prosta, do obliczeń należy jednak brać wartości skuteczne tych wielkości. Wzór na moc przybiera postać:

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

W obwodach prądu zmiennego rzadko występują obciążenia czysto rezystancyjne, zwykle mamy do czynienia z reaktancyjnymi odbiornikami energii o charakterze indukcyjnym lub pojemnościowym. Obciążenia reaktancyjne mają zdolność magazynowania energii. Zasilanie ich napięciem zmiennym powoduje okresowy przepływ tej energii w przeciwnych kierunkach (do/z odbiornika). Zmagazynowana w obciążeniu reaktancyjnym moc zwracana do źródła, mierzona za okres, nazy-



wana jest mocą bierną. Ten rodzaj mocy nie zamienia się w pracę mechaniczną lub ciepło. Jest to możliwe wyłącznie dla obciążeń rezystancyjnych, wówczas ilościowo opisuje to moc czynna. W tym przypadku rozpatrujemy taką część energii, która w analogicznym obwodzie prądu stałego spowodowałaby ten sam skutek. Rozpatrujemy więc wartości skuteczne napięcia i prądu. Należy zauważyć, że moc czynna będzie występowała praktycznie w każdym fizycznym obwodzie elektrycznym, gdyż zawsze będzie ono zawierał jakiś element o czystej rezystancji (np. przewody doprowadzające o niezerowej rezystancji). Opisany wyżej przepływ energii pomiędzy obciążeniem reaktancyjnym i źródłem jest przyczyną przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. Ostatecznie moc czynna jest określona zależnością:

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \theta$$

gdzie θ jest kątem przesunięcia fazowego między napięciem i prądem.

Przez wiele lat stosowano w elektronice stosunkowo proste techniki budowy urządzeń zasilających wykorzystujące elementy liniowe. Rozwiązania takie charakteryzowały się małą sprawnością, a więc również sporymi stratami, nie sprawiały jednak większych trudności podczas po-

miarów parametrów. Częstotliwość sieci energetycznych równa 50 lub 60 Hz jest na tyle niska, że pomiar nawet 30. harmonicznej nie stanowi większego wyzwania technicznego. Technika jednak szybko posunęła się naprzód. Obecnie coraz częściej stosowane są zasilacze impulsowe i przetwornice pracujące z dużymi częstotliwościami. Pomiary takich urządzeń nie są już tak trywialne, ba..., coraz częściej należy sięgać po bardzo wyrafinowane, specjalizowane przyrządy. Stosowany w dalszej części artykułu termin „pomiar zasilania” należy odnosić zarówno do wszelkiego rodzaju urządzeń zasilających, jak i sieci elektrycznych i energetycznych. Nie chodzi jedynie o samą moc, ale też szereg innych związanych z nią parametrów.

Przyrządy pomiarowe wykorzystywane do pomiarów zasilania

Przydatność zwykłego oscyloskopu cyfrowego do pomiarów zasilania nie jest zbyt duża z kilku powodów. Najważniejszym jest brak funkcji pomiarowych wykonujących specjalistyczne obliczenia. Potrzebne są również odpowiednie sondy, np. wysokonapięciowa i prądowa. Problemem może być także liczba dostępnych kanałów

pomiarowych, np. do zmierzenia napięć i prądów w sieci 3-fazowej, do dyspozycji należy mieć co najmniej 6 wejść. W ofercie Yokogawy znajduje się wprawdzie oscyloskop DLM4000 oferowany z opcjami programowymi do pomiarów elektrycznych, ale trudno ten przyrząd zaliczyć do typowych. Jest to potężna, 8-kanalowa maszyna, która z dedykowanymi opcjami zbliża się bardziej do przyrządu specjalistycznego niż uniwersalnego, jednak zestaw elementów regulacyjnych jest charakterystyczny dla zwykłych oscyloskopów.

W nowoczesnych oscyloskopach cyfrowych implementowane są złożone obliczenia matematyczne, które mogą być wykorzystane do wyznaczania parametrów zasilania. Potrzebne do tego wartości napięć i prądów zbierane są w procesie akwizycji. Do obliczenia np. mocy czynnej wystarczy wprowadzić odpowiednią formułę w funkcji obliczeniowej. W ogólnym przypadku moc czynna jest wyrażana wzorem:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \cong \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cdot i(k) \cdot \Delta t$$

gdzie T jest okresem przebiegu, a N jest liczbą próbek zebranych w jednym okresie.

Dostępne funkcje obliczeniowe to jednak nie wszystko. Do pomiarów parametrów zasilania, szczególnie w przypadku nowoczesnych urządzeń, stawiane są ostre wymagania dotyczące wielu parametrów oscyloskopu (lub specjalizowanego miernika). Są to:

- **Pasmo analogowe.** Pasmo oscyloskopu musi być na tyle szerokie, aby obejmowało składnik widma mierzonej mocy o najwyższej częstotliwości. W dokumentacji technicznej podawane jest zwykle tzw. pasmo 3-decybelowe, co oznacza, że na jego końcu sygnał jest zmniejszony o 30% w odniesieniu do poziomu sygnału z początku pasma. Gdyby przyjąć takie parametry, oznaczałoby to, że pomiary najwyższych harmonicznych byłyby zaniżone. Z tego względu zalecane jest, aby pasmo oscyloskopu było szersze, niż najwyższa harmoniczna mierzonej mocy.
- **Pamięć i szybkość próbkowania.** Szybkość próbkowania powinna być większa od najwyższej składowej widma. Aby prawidłowo oddać kształt sygnału, częstotliwość próbkowania powinna być wyższa np. 10-krotnie. Próbkę sygnału są zapisywane w pamięci. Jej wielkość musi być na tyle duża, aby pomieściła wymaganą liczbę pełnych okresów przebiegu.
- **Dokładność.** Dokładność oscyloskopów zwykle mieści się w przedziale między 2,5 a 3% dla pomiarów DC. Parametr ten pogarsza się dla pomia-

rów AC. Producenci często nie podają wprost dokładności oscyloskopów, kojarzą ją z parametrem ENOB, czyli rzeczywistą rozdzielczością. W większości oscyloskopów stosowane są przetworniki 8-bitowe.

- **Wpływ parametrów sond na wyniki pomiarów.** Oscyloskopy są przystosowane do pomiarów napięć (i to niezbyt wysokich, rzędu kilkudziesięciu woltów). Pomiary urządzeń i sieci zasilających wymagają stosowania specjalnych sond wysokonapięciowych i prądowych, które dopasowują sygnał wejściowy do dopuszczalnego zakresu i postaci. Każda sonda może jednak pracować w określonym dla niej paśmie. Powstają więc dodatkowe błędy wynikające z tego ograniczenia. Nie bez znaczenia dla pomiarów zasilania są opóźnienia i współczynniki slew rates charakterystyczne dla zastosowanych sond. Są one przyczyną powstawania błędów fazowych, które powinny być korygowane podczas wykonywania obliczeń.
- **Wpływ wszystkich elementów toru pomiarowego na całkowitą dokładność pomiaru mocy.** Jak wynika ze wzoru na moc w obwodzie prądu zmiennego, parametr ten zależy od kilku czynników mierzonych różnymi kanałami pomiarowymi, z użyciem różnych sond pomiarowych. Całkowita dokładność pomiaru zależy więc od parametrów każdej z zastosowanych sond, przy uwzględnieniu wnoszonych przez nie błędów fazowych.

Korzyści wynikające z oscyloskopowej metody pomiaru mocy

Pomiar mocy sieci jednofazowych można względnie łatwo przeprowadzić wykorzystując oscyloskop. Trudno natomiast oszacować błąd takiego pomiaru i zapewnić dużą powtarzalność wyników. Można szacować, że bez specjalnej kalibracji uzyskuje się dokładność rzędu 5...10%, a więc wystarczającą do wstępnej oceny badane-

go obiektu i sprawdzenia zgodności z normami.

Do pomiarów mocy bardzo dobrze nadaje się 8-kanalowy oscyloskop DLM400 Yokogawy z opcją /G4. Zapewnia on całkowicie automatyczne wykonywanie pomiarów mocy, praktycznie bez żadnych czynności manualnych i bez wykorzystywania kursorów. Automatycznie dokonywana jest też korekcja parametrów stosowanych sond. Opcja /G4 zawiera funkcje obliczające parametry jakości mocy. Oscyloskop ten nadaje się m.in. do pomiarów przetwornic pracujących z wysokimi częstotliwościami, dla których nawet wysokoczęstotliwościowe mierniki mocy okazują się niewystarczające.

Mierniki i analizatory mocy

W przeciwieństwie do oscyloskopów, specjalizowane mierniki mocy i analizatory jakości mocy charakteryzują się bardzo dużą dokładnością, np. miernik Yokogawa WT3000 zapewnia dokładność 0,02...0,04% zakresu. Tak duża dokładność wymaga kalibracji w specjalizowanych laboratoriach gwarantujących małe niepewności pomiarowe i umożliwiających przeprowadzenie kalibracji dla wysokich częstotliwości. Jednym z takich laboratoriów jest Yokogawa European Standards Laboratory.

Mierniki mocy mierzą moc średnią wydzielną na obciążeniu w zadanym przedziale czasu. Wykorzystywany jest do tego najczęściej procesor DSP wykonujący operację całkowania napięcia i prądu w każdym cyklu przebiegu. Po ewentualnych innych obliczeniach wynik jest wyświetlany na wskaźniku cyfrowym. Jedną z większych trudności sprawia dokładne określenie cyklu mierzonego przebiegu. Najczęściej wykorzystuje się do tego detektor przejścia przez zero, ale na skutek wpływu ewentualnych składowych wysokoczęstotliwościowych i szumu, operacja ta może być wykonana z ograniczoną dokładnością. Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego nie jest wskazane ze względu na jego ewentualny wpływ na wynik po-





miaru. W precyzyjnym analizatorze mocy WT3000 zastosowano inne rozwiązanie. Obliczenia oparto na uśrednianiu wykładniczym (EAMP – *Exponential Average for Measuring Period*) wykorzystującym specjalny filtr cyfrowy. Metoda ta w przeciwieństwie do spotykanej również metody ASSP (*Average Synchronous Source Period*) nie wymaga precyzyjnego określania okresu badanego przebiegu, zapewniając jednocześnie bardzo dużą dokładność obliczeń. Wadą jej jest natomiast stosunkowo długi czas aktualizacji pomiarów.

Dla zapewnienia dużej dokładności i powtarzalności pomiarów niezbędne jest wykonywanie okresowych kalibracji przyrządu. Kalibracja nie eliminuje jednak błędów wynikających z występowania sygnału wspólnego na wejściach napięciowych i prądowych. Pojawiający się na nich wysokoczęstotliwościowy szum stanowi źródło prądu przepływającego przez pojemności upływu do ziemi, a na skutek nawet niewielkich różnic w budowie poszczególnych torów pomiarowych generowane są dodatkowe błędy przetwarzania analogowo-cyfrowego, a w konsekwencji dalsze błędy pomiarów. W celu minimalizacji tych efektów konieczne jest zapewnienie wysokiego współczynnika tłumienia sygnałów wspólnych CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) we wszystkich kanałach pomiarowych.

W czasie wykonywania pomiarów mocy mogą występować fluktuacje obciążenia. Najprostszą metodą eliminacji wynikających z tego błędów jest uśrednianie wyników. W miernikach mocy WT310/WT330 Yokogawy możliwe jest wybieranie uśredniania wykładniczego lub kroczącego, gwarantujące uzyskiwanie dokładności rzędu 0,1%. Są jednak przypadki, w których uśrednianie nie jest wskazane. Po włączeniu tej funkcji mierniki dokonują 10 pomiarów w ciągu sekundy. W takim trybie mierzona jest na przykład moc rozruchowa silnika, moc kuchenki mikrofalowej itp.

Coraz większą popularnością wśród miłośników motoryzacji cieszą się samochody z napędem hybrydowym. Pomiar

napędu elektrycznego można wykonywać na przykład precyzyjnym miernikiem Yokogawa WT1800. Odznacza się on jeszcze większą dokładnością niż wspomniane WT310/WT330, oferuje bardzo szybkie pozyskiwanie danych umożliwiające dokonywanie pomiarów napięcia/prądu/mocy w sieciach 3-fazowych, ale też momentu obrotowego, prędkości obrotowej i mocy mechanicznej z 5-milisekundowymi odstępami czasu przy wyłączonej synchronizacji zewnętrznej. Po włączeniu synchronizacji wewnętrznej pomiary są robione z odstępami co 1...100 ms (w zależności od częstotliwości zewnętrznego przebiegu synchronizującego). Zastosowania tego przyrządu są znacznie szersze, np.: w sprzęcie kosmicznym, energetyce alternatywnej itp.

Do rutynowych, codziennych pomiarów mocy można polecić analizator WT3000. Standardowo zapewnia on odświeżanie danych na wyświetlaczu co 50 ms, ale dostępna jest też opcja pomiaru cykl do cyklu. Miernik jest niezastąpiony w pomiarach inwerterów fotowoltaicznych, i transformatorów mocy.

Rejestrator oscyloskopowy, systemy akwizycji danych

Badanie systemów zasilających często wymaga długoterminowego śledzenia parametrów, trwającego nawet do 200 dni. Wykorzystywane do tego przyrządy muszą być przystosowane do magazynowania dużych ilości

danych, najczęściej zachowują przy tym funkcjonalność zwykłych mierników mocy.

W ofercie Yokogawy znajduje się ScopeCorder DL850, który z opcją /G5 może mierzyć 125 parametrów systemów zasilania i wyświetlać je w czasie rzeczywistym. Przyrząd ten ma budowę oscyloskopu, ale nawet jeśli tak się go zakwalifikuje, to nie będzie to zwykły oscyloskop. Wyróżniającą cechą jest możliwość konfiguracji kanałów wejściowych zawierających 16-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe. Elementy te poprawiają dokładność pomiarów, która zdecydowanie przewyższa dokładność osiąganą w zwykłych oscyloskopach.

Precyzyjny oscyloskop do pomiaru mocy

PX8000 to ostatni, najbardziej zaawansowany technicznie przyrząd Yokogawy wykorzystywany do pomiarów mocy. Będzie on dokładnie omówiony w drugim odcinku artykułu, a teraz tylko krótko go scharakteryzowano.

PX8000 pokonuje ograniczenia zwykłych mierników mocy i oscyloskopów wykorzystywanych do takich pomiarów. Można go z pewnością zakwalifikować jako oscyloskop, potwierdzeniem tego jest zasada pomiaru wykorzystywana w podstawowym trybie pracy. Przyrządem tym można mierzyć zarówno stałe, jak i zmienne parametry mocy. Cechą wyróżniającą są pomiary kursorowe, wyznaczające przedział analizy przebiegu. Jest to tryb szczególnie przydatny na przykład podczas analizy zjawisk przejściowych. Podobnie jest z badaniem zużycia energii przez urządzenia będące w stanie uśpienia, a następnie przechodzących do stanu aktywnego. Stany przejściowe mierzy się oscyloskopem PX8000 wykorzystując tryb analizy trendu cykl po cyklu.

Największą zaletą oscyloskopu PX8000 jest duża szybkość akwizycji danych i szerokie pasmo. Dzięki tym cechom, przyrządem tym mogą być wykrywane nietypowe zjawiska występujące w nowoczesnych systemach zasilania, przetwornicach, falownikach, zasilaczach impulsowych itp.

Jarosław Doliński, EP

