

Aparatura pomiarowa w energetyce

Każdy elektronik, w swojej praktyce, ma do czynienia z pomiarami wielkości elektrycznych. Typowe uniwersalne przyrządy pomiarowe potrafią mierzyć napięcie i prąd, stały i przemienny, oraz rezystancję. W bardziej rozbudowanych multimetrach pojawia się możliwość pomiaru częstotliwości, pojemności kondensatorów, indukcyjności i wzmocnienia prądowego tranzystorów. Zaawansowane pomiary umożliwia oscyloskop. Nowoczesne oscyloskopy cyfrowe, oprócz obserwowania kształtu sygnału, mierzą okres i częstotliwości sygnałów okresowych, przesunięcie fazowe, długość impulsów, amplitudę sygnału, itp. Zmierzone wartości mogą być wyświetlane w postaci cyfrowej na ekranie, a pomiar ułatwiają wyświetlane kursory. W wielu przypadkach rozbudowany multimetr i oscyloskop cyfrowy spełniają w 100% potrzeby pomiarowe w pracowni elektronika, ale będą niewystarczające do pomiaru instalacji energetycznych.

Pomiary w energetyce dotyczą również wielkości elektrycznych, ale ze względu na zakresy występujących tam napięć i przepływających prądów do pomiarów używa się specjalizowanej aparatury pomiarowej. Trzeba również pamiętać, że w energetycznych systemach przesyłowych występuje, niemal wyłącznie, trójfazowe napięcie przemienne. Nawet napięcie stałe z paneli fotowoltaicznych jest przekształcane w układach falowników na napięcie przemienne.

System energetyczny ma za zadanie wytworzenie energii elektrycznej, a potem przesłanie jej do odbiorców. Moc energii elektrycznej to w uproszczeniu iloczyn napięcia i prądu. Przy dużych mocach mogą się pojawić w długich liniach energetycznych straty energii spowodowane rezystancją przewodów. Tracona energia zamienia się nieodwracalnie w ciepło. Rezystancję linii przesyłowej można ograniczać, stosując większe przekroje przewodów i metale o małym oporze właściwym. W obu przypadkach koszty linii bardzo rosną ze względu na cenę przewodów miedzianych o dużym przekroju i koszty słupów i izolatorów, które musiałyby udźwignąć ciężkie przewody o dużym przekroju. Dlatego, żeby ograniczyć przepływ prądu przy określonej mocy, podnosi się napięcie.

Napięcia w liniach energetycznych przesyłających duże moce mogą mieć wartości nawet do 400 kV. Poza tym spotyka się wartości 220 kV i 110 kV. Takie linie nazywa się liniami najwyższych napięć (NN). Im dalej od głównych źródeł zasilania, tym napięcia są niższe. W bardzo rozbudowanej sieci średniego napięcia, w większości przypadków, występuje napięcie 15 kV, ale spotyka się też wartości 6 kV, 20 kV czy 30 kV. Końcowy odbiorca indywidualny i przemysłowy korzysta z sieci trójfazowej lub jednofazowej o napięciu 0,4 kV/0,23 kV. Prądy robocze płynące w liniach energetycznych mogą mieć wartości setek amperów, a prądy zwarciove to kiloampery. Takie zakresy wartości wymagają specjalnych technik pomiarowych.

Przekładniki napięciowe

Klasyk pomiar napięcia multimetrem polega na ręcznym lub automatycznym wyborze zakresu pomiarowego i podłączeniu przewodów

pomiarowych do punktu pomiaru i odczytaniu zmierzonej wartości na wyświetlaczu lub skali miernika analogowego. Tak również możemy mierzyć parametry w sieciach niskiego napięcia. W przypadku bardzo wysokich i średnich napięć, ze względu na możliwość porażenia przez łuk elektryczny, do pomiarów zarówno napięć, jak i prądów stosuje się odpowiednio zaprojektowane sensory pomiarowe. Najstarszymi i najczęściej stosowanymi sensorami są przekładniki napięciowe i prądowe.

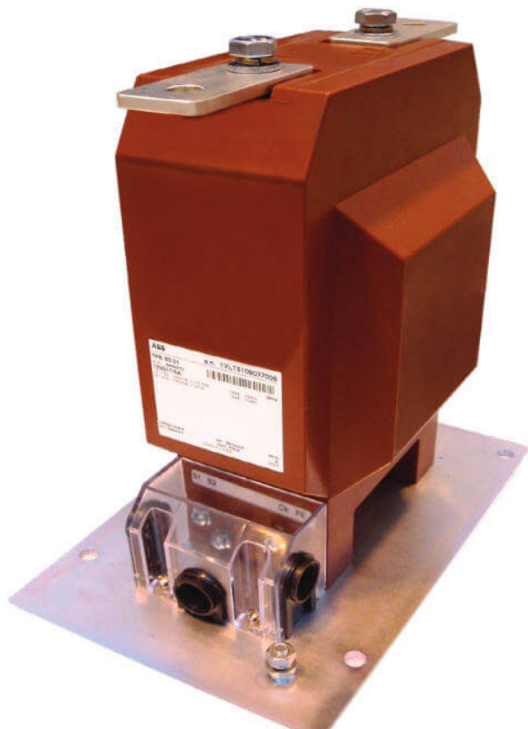
Przekładnik napięciowy to klasyczny transformator o specjalnej konstrukcji zapewniającej wymaganą izolację pomiędzy uzwojeniem pierwotnym włączanym w obwód wysokiego napięcia i pomiarowym uzwojeniem wtórnym. Przekładnik może być jednofazowy lub trójfazowy i pracuje w stanie jałowym (bez obciążenia). Układ mierzący napięcie wtórne przekładnika napięciowego musi mieć odpowiednio dużą impedancję wejściową. Napięcie na wyjściu jest znormalizowane i wynosi 100 V dla przekładnika jednofazowego i $100/\sqrt{3}$ V dla przekładnika trójfazowego. Parametry techniczne to przekładnia, moc (maksymalna moc, którą można go obciążyć, by mierzył zgodnie z klasą dokładności) i klasa dokładności.

Na **fotografii 1** pokazano wygląd jednobiegunowego przekładnika na napięcie 24 kV produkowanego przez firmę ABB, o następujących parametrach znamionowych:

- maksymalny poziom izolacji: 24/50/125 kV,
- znamionowe napięcie pierwotne: (1...22): $\sqrt{3}$ kV,
- znamionowe napięcie wtórne:
 - pomiarowe – (100; 110; 200; 220 lub 380): $\sqrt{3}$ V,
 - dodatkowe – 100:3 lub 110:3 V,
- moc znamionowa/klasa uzwojenia pomiarowego [VA]: do 50/klasa 0,2; do 125/klasa 0,5; do 250/klasa 1,



Fotografia 1. Przykładowy przekładnik napięciowy wewnętrzny UD224-1 produkcji ABB



Fotografia 2. Przykładowy przekładnik prądowy

- moc znamionowa/klasa uzwojenia zabezpieczeniowego [VA]: 30/3P; 50/6P,
- klasa izolacji: E.

Napięcie wtórne może być mierzone przez analogowy miernik elektromagnetyczny wyskalowany w kilowoltach. Taki pomiar kiedyś chętnie stosowany na stacjach energetycznych, nie jest obecnie spotykany, a napięcie wtórne z przekładników napięciowych jest mierzone przez cyfrowe układy pomiarowe.

Przekładniki prądowe

Przekładnik prądowy również jest rodzajem transformatora, w którym prąd uzwojenia wtórnego jest proporcjonalny do prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym, przy czym oba te prądy nie są przesunięte w fazie. Konstrukcja przekładnika prądowego umożliwia jego pracę na granicy zwarcia. Układ pomiarowy musi mieć bardzo małą impedancję wejściową.



Fotografia 3. Przekładnik prądowy montowany na przewód (szynę)

Przykładowy przekładnik prądowy został pokazany na **fotografii 2**. Do zacisków śrubowych jest podłączany obwód wysokoprądowy. Ponieważ obwód pomiarowy przekładnika ma potencjał wysokiego napięcia, musi być zastosowana odpowiednia izolacja, podobnie jak w przypadku przekładnika napięciowego. Użycie takiego przekładnika prądowego wymaga przecięcia mierzonego obwodu. Dostępne są przekładniki o takiej konstrukcji, że zakłada się je bezpośrednio na przewód z prądem (kable lub szynę) bez konieczności rozcinania obwodu. Przykładowy przekładnik został pokazany na **fotografii 3**. Przekładniki prądowe mają kilka podstawowych parametrów:

- znamionowy prąd pierwotny na przykład 100 A, 300 A, 600 A,
- znamionowy prąd wtórny 1 A lub 5 A,
- przekładnia,
- moc przekładnika,
- dopuszczalne napięcie robocze,
- klasa dokładności,
- maksymalny prąd dynamiczny.

Przyjmuje się, że prąd w uzwojeniu wtórnym ma zakres pomiarowy 5 A lub 1 A. Warto wspomnieć także o maksymalnym prądzie dynamicznym. W obwodach energetycznych trzeba się spodziewać krótkotrwałych prądów zwarciovych osiągających wartości równe wielokrotności zakresu pomiarowego. Przy takich prądach mogą się pojawić silne zjawiska elektrodynamiczne i cieplne. Przekładnik musi mieć konstrukcję, która jest w stanie wytrzymać działanie tych zjawisk przez określony czas. Maksymalny prąd dynamiczny może wynosić, np. 150-krotną wartość znamionowego prądu pierwotnego.

Przekładniki prądowe muszą być eksploatowane przez wykwalifikowany personel. Jeżeli przy przepływie prądu pierwotnego zostanie rozarty obwód wtórny, to na jego zaciskach może się pojawić wysokie napięcie niebezpieczne dla życia i zdrowia. Przekładniki powinno się łączyć z obwodami pomiarowymi przez specjalne złącze umożliwiające zwarcie obwodu wtórnego na czas wykonywania czynności serwisowych w obwodach pomiarowych.

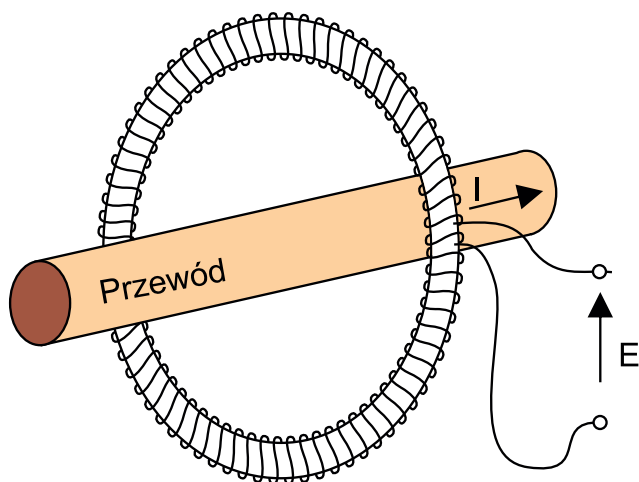
Sensory napięciowe, prądowe i kombisensory

Przekładniki napięciowe i prądowe to niejedynie sensory pozwalające na pomiar napięć i prądów w obwodach wysokich napięć. Do pomiaru napięcia stosuje się sensory rezystancyjne lub pojemnościowe, a do pomiaru prądu cewki Rogowskiego. Coraz częściej stosowane są zespolone kombisensory umożliwiające pomiar napięć i prądów. Na **fotografii 4** pokazano kombisensory serii KEVCD, w którym czujnikiem napięcia jest dzielnik rezystancyjny, a czujnikiem prądu cewka Rogowskiego.

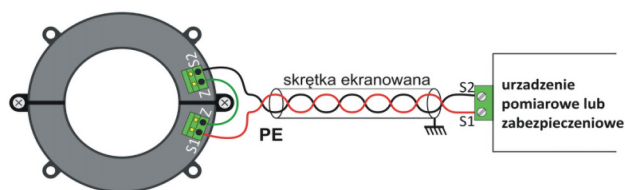
Przekładniki prądowe coraz częściej są zastępowane przez sensory prądowe nazywane cewką Rogowskiego. Jest to rodzaj transformatora bezrdzeniowego o konstrukcji pozwalającej na założenie go bezpośrednio na przewód bez konieczności rozłączania obwodu prądowego.



Fotografia 4. Kombisensor KEVCD24AE3

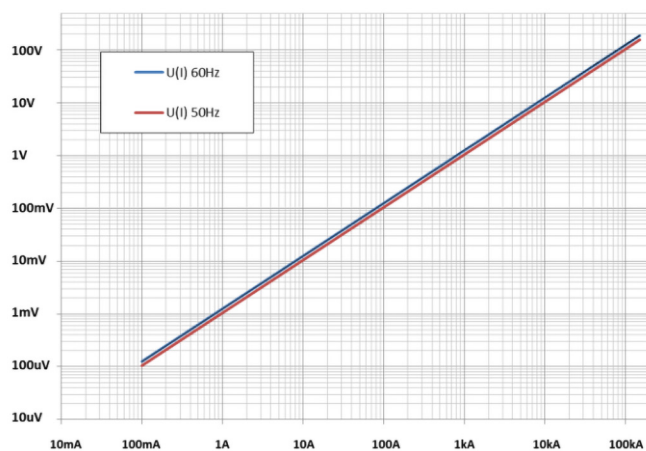


Rysunek 1. Idea działania cewki Rogowskiego



Fotografia 5. Sensor prądowy CRR 1-50 produkcji ITR

Napięcie indukowane w uzwojeniu cewki jest proporcjonalne do pochodnej natężenia prądu przepływającego przez przewód (rysunek 1). Ten sensor nie stwarza zagrożenia porażeniem przy rozwieraniu obwodu pomiarowego. Na fotografii 5 pokazano cewkę Rogowskiego CRR 1-50 produkcji polskiej firmy ITR Energetyka. Charakterystyka przetwarzania (zależność napięcia wyjściowego od mierzonego prądu, została pokazana na rysunku 2.



Rysunek 2. Charakterystyka przetwarzania sensora CRR 1-50

Pewną niedogodnością sensorów opartych na cewkach Rogowskiego są niskie poziomy napięć wyjściowych. Jak pokazano na rysunku 2, napięcia wyjściowe dla typowych mierzonych prądów 10...600 A zmieniają się w zakresie od 10 do kilkuset mV. Środowisko pomiarowe w stacjach energetycznych często charakteryzuje się sporym poziomem zakłóceń EMI. Prądy indukowane przez te zakłócenia w przewodach pomiarowych mogą zafałszować wynik pomiaru. Dlatego sygnały wyjściowe powinny być doprowadzane kablami ekranowanymi o określonej przez producenta maksymalnej długości. Trzeba również pamiętać o uziemieniu ekranu kabla zgodnie z zaleceniami producenta sensora. Klasyczne przekładniki prądowe są pod tym względem bardziej odporne na zakłócenia, szczególnie te o prądzie wyjściowym do 5 A.

Stosowanie sensorów napięciowych opartych na dzielniku rezystancyjnym lub pojemnościowym jest również wygodniejsze od przekładników napięciowych, szczególnie w układach średniego napięcia. Takie sensory są mniejsze, lżejsze i łatwiej je stosować w układach zewnętrznych. Jednak brak izolacji galwanicznej wynikającej z zasady działania wymusza użycie dodatkowych układów zabezpieczających przed porażeniem w przypadku rozwarcia obwodu dzielnika napięcia. Mogą to być układy zabezpieczające warystorowe lub półprzewodnikowe, na przykład diody lawinowe.

Kontrola i rozliczanie

Opisane sensory umożliwiają pomiar napięć i prądów w obwodach energetycznych charakteryzujących się dużymi napięciami roboczymi i dużymi prądami roboczymi. Podstawowe zastosowanie pomiaru prądu i napięcia ma na celu bieżącą kontrolę parametrów linii przesyłowych. W stanie normalnym (bez awarii lub przeciążenia) głównym parametrem mierzonym jest wartość przepływającego prądu przy założeniu, że napięcie na liniach ma określoną wartość mieszczącą się w dopuszczalnej tolerancji. Na podstawie zmierzonego napięcia i prądu wyliczana jest jedna z ważniejszych wielkości, czyli moc przenoszona przez linię przesyłową i odbierana na przykład przez indywidualnych odbiorców lub zakłady przemysłowe, usługowe itp.

Kolejnym zastosowaniem pomiarów jest kontrola i zabezpieczenie linii przesyłowych przed zwarcie lub przeciążeniem. Przy bardzo wysokich mocach dostępnych w energetyce na każdym z poziomów przesyłania od najwyższych napięć do sieci niskiego napięcia niezbędny jest system zabezpieczeń zapobiegający skutkom zwarć i przeciążeń. Bez takich zabezpieczeń system energetyczny mógłby się załamać na terenie całego kraju lub na określonym obszarze. Uszkodzeniu mogłyby ulec linie i stacje przesyłowe, ale też stacje rozdzielcze w zakładach produkcyjnych i stacjach zasilania odbiorców indywidualnych. W obwodach niskiego napięcia powszechnie stosuje się bezpieczniki topikowe mocy, ale w obwodach średnich i wysokich napięć stosowane są często bardzo rozbudowane cyfrowe układy zabezpieczeń pozwalające wykryć rodzaj zwarcia (międzyfazowe lub doziemienie) oraz kierunek zwarcia (od strony zasilania lub obciążenia). Te układy muszą mieć informację o przepływającym prądzie i napięciu na wszystkich trzech fazach.

Dokładny pomiar napięcia i prądu jest również konieczny w układach rozliczeniowych zużytej energii (licznikach energii). Stosowane sensory muszą mieć określoną dokładność (klasę) i spełniać normy właściwe dla sensorów przeznaczonych do pomiaru energii. Dynamicznie rozwijający się rynek OZE (odnawialne źródła energii) wymusił również stosowanie odpowiedniej aparatury pomiarowej w układach fotowoltaiki (panele słoneczne) i innych źródłach energii, np. elektrowniach wiatrowych. Większość tych pomiarów jest taka sama, jak w przypadku linii przesyłowych.

Oprócz podstawowych pomiarów prądów i napięć wykonuje się szereg innych pomiarów, na przykład pomiary izolacji, pomiary częstotliwości czy pomiary zniekształceń harmonicznych kształtu sygnału prądu.



Fotografia 6. Zaawansowany miernik parametrów sieci ND30 firmy LUMEL

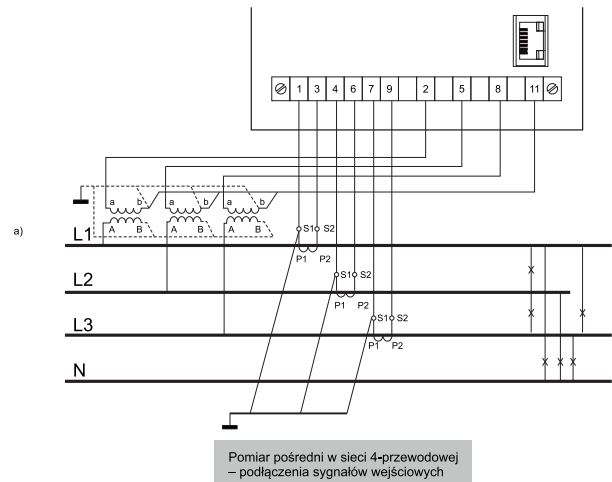
Aparatura pomiarowa

W energetyce aparatura pomiarowa może mieć formę klasycznego miernika z wyświetlaczem numerycznym lub ekranem. Takie mierniki są stosowane powszechnie i służą do kontroli parametrów elektrycznych w miejscu pomiaru, na przykład na stacjach energetycznych. Sporą grupą układów pomiarowych są układy, które wykonują pomiary i przesyłają je zdalnie przez łącza stałe (na przykład światłowód) lub łącza radiowe do centrów dyspozytorskich, w których pracują komputerowe systemy SCADA. Taka aparatura pomiarowa może mieć lokalny wyświetlacz, ale nie musi. Pomiar napięć i prądów umożliwia zaimplementowanie w rozbudowanych cyfrowych miernikach wielu dodatkowych funkcji, takich jak:

- wyliczenie mocy czynnej, biernej, pozornej oraz współczynnika mocy,
- wykrywanie zaniku fazy/faz,
- wykrywanie asymetrii napięć lub prądów w układzie trójfazowym,
- wykrywanie niepoprawnej kolejności faz,
- wykrywanie spadku lub wzrostu napięcia i sygnalizacja przekroczenia zadanego progu.

Przykładem takiego inteligentnego miernika może być miernik parametrów sieci ND30 produkcji polskiej firmy Lumel (fotografia 6). ND30 jest miernikiem parametrów jakości zasilania w wykonaniu tablicowym i umożliwia pomiar 54 wielkości elektrycznych oraz dodatkowo pomiar harmonicznych sinusoidalnego przebiegu napięcia. Pomiary można przesyłać do systemów nadrzędnych SCADA przez interfejs Ethernet. Zaimplementowane są protokoły Modbus, TCP/IP, HTTP, FTP i MQTT (w wersji miernika ND30 IoT). Konfigurację i programowanie parametrów umożliwia bezpłatny program eCon. Miernik ma wbudowany konfigurowalny kolorowy ekran graficzny LCD TFT 3,5" o rozdzielczości 320×240 pikseli. Możliwości pomiarowe są spore:

- pomiar napięć fazowych i międzyfazowych,
- pomiar prądów fazowych,
- pomiar fazowych mocy czynnych P, biernych Q i pozornych S oraz mocy 3-fazowych,
- pomiar fazowych współczynników mocy czynnej P_f ,
- pomiar fazowych współczynników mocy biernej do czynnej $tg \phi$,
- napięcie trójfazowe średnie,
- prąd trójfazowy średni,
- moc czynna średnia, na przykład 15, 30, 60 minut,



Rysunek 3. Połączenie wejść pomiarowych miernika ND30 z sensorami

- moc pozorna średnia P_{demand} ,
- prąd uśredniony.

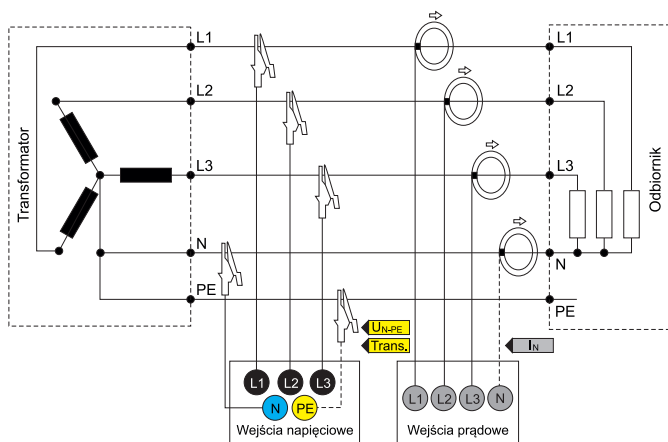
Miernik mierzy również harmoniczne napięć i prądów do 63. oraz współczynniki zniekształceń harmonicznych THD. Wejścia pomiarowe napięciowe są przystosowane do pomiaru napięć bezpośrednio z sieci energetycznej niskiego napięcia NN lub z przekładników napięciowych. Po przeskalowaniu miernik może mierzyć napięcia do 2000 kV. Wejścia prądowe mają zakresy 1 A i 5 A. Jak wiemy, są to prądy wtórne typowych przekładników prądowych. Maksymalny zakres pomiarowy po przeskalowaniu wynosi 6 kA. Przykład połączenia wejść pomiarowych z sensorami został pokazany na rysunku 3. Pomiar prądów fazowych jest wykonywany przez przekładniki prądowe, a pomiar napięć fazowych przez przekładniki napięciowe.

Innym przykładem miernika jakości zasilania jest PQM-711 również polskiej firmy Sonel. Pokazany na fotografii 7 przyrząd komunikuje się poprzez Wi-Fi z dedykowanym tabletem, na którym jest uruchamiana specjalna aplikacja Sonel Analiza. Przyrząd jest przeznaczony do pomiaru napięć w zakresie do 760 V i prądów skutecznych do 3000 A. Napięcie jest mierzone za pomocą sond połączonych na stałe z miernikiem, a pomiar prądu za pomocą wymiennych cęgów. Mierzone parametry:

- napięcia skuteczne i międzyfazowe w zakresie do 760 V,
- prądy skuteczne do 3000 A,
- częstotliwość sieci 40...70 Hz,
- składowe harmoniczne napięć i prądów do 50.,



Fotografia 7. Analizator jakości energii Sonel PQM-702



Rysunek 4. Podłączenie miernika PQM-702 do czteroprzewodowej sieci energetycznej

- współczynniki zniekształceń harmoniczných dla napięcia i prądu,
- współczynnik strat K wywołany wyższymi harmonicznymi,
- moce czynne i bierne harmoniczných,
- współczynniki mocy $\cos \varphi$ i $\tan \varphi$,
- współczynnik asymetrii sieci trójfazowych i składowe symetryczne.

Zakresy mierzonych napięć PQM-702 predestynują go do pracy w sieciach niskich napięć NN. Może być wykorzystywany przez służby energetyczne zakładów produkcyjnych, służby energetyki zawodowej, jak również przez zewnętrznych serwisantów. Na **rysunku 4** pokazano sposób dołączenia miernika do układu trójfazowego typu gwiazda z przewodem neutralnym.

Analiza zawartości harmoniczných w przebiegu prądu lub napięcia

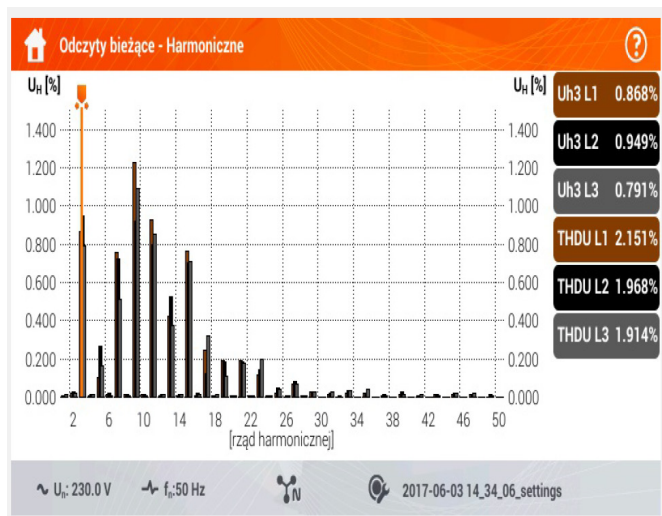
Oba mierniki mają wbudowane funkcje pomiaru harmoniczných i wyliczania współczynnika zniekształceń harmoniczných. Zawartość harmoniczných w sygnale sinusoidalnym określa, na ile ten sygnał jest odkształcony od idealnej sinusoidy. Zazwyczaj zniekształcenia harmoniczne są kojarzone na przykład z torami audio wysokiej jakości. Ale pomiar wartości zniekształceń nieliniowych w sieciach energetycznych jest na tyle istotny, że graniczne amplitudy harmoniczných opisują normy EN.

Duże odkształcenie przebiegu prądu powoduje, że pojawiają się wysokie częstotliwości podające efekt naskórkowości, a w konsekwencji grzanie się przewodów większe, niżby to wynikało z głównego obciążenia. W czteroprzewodowej sieci trójfazowej trzecia harmoniczna i jej wielokrotności się nie zerują i w przewodzie neutralnym popłynię prąd, który może go rozgrzać i uszkodzić izolację. Podobne zjawiska zachodzą w transformatorach zasilających. Do strat w przewodach uzwojeń dochodzą straty w rdzeniu powodowane przez prądy wirowe. Straty te są proporcjonalne do kwadratu częstotliwości.

Odształcony przebieg napięcia powoduje też problemy z zasilaniem indukcyjnych silników elektrycznych. W uzwojeniach powstają straty cieplne wywołane prądami wirowymi analogicznie jak w transformatorach. Dodatkowo, tak zasilany silnik wpada w vibracje ograniczającą jego trwałość. Moment obrotowy silnika w założonym kierunku powodują harmoniczne zgodne rzędu 1, 4, 7, ale harmoniczne przeciwnego rzędu 2, 5, 8 powodują powstawanie momentu przeciwnego do obrotu wirnika. W wyniku tego powstają niepożądane vibracje i dodatkowe grzanie się silnika. Na **rysunku 5** pokazano ekran pomiaru harmoniczných przez miernik PQM-707 firmy Sonel.

Pomiar współczynnika mocy

Współczynnik mocy w sieciach energetycznych to dość istotny parametr definiowany jako stosunek mocy czynnej do mocy pozornej.



Rysunek 5. Ekran analizatora Sonel PQM-707 w czasie pomiaru harmoniczných

W sieciach z przebiegami sinusoidalnymi można go zdefiniować jako kosinus kąta przesunięcia fazowego ($\cos \varphi$) pomiędzy napięciem i prądem. Im bardziej $\cos \varphi$ jest mniejsze od 1 tym większy jest udział mocy pozornej. Wiele odbiorników w sieci ma charakter indukcyjny (silniki, transformatory). Energia w takich odbiornikach jest magazynowana w postaci pola magnetycznego i kiedy to pole znika, to jest ona zwracana do sieci, powodując obciążenie mocą pozorną. Przy dużych obciążeniach przepływ mocy pozornej niewykorzystanej do wykonania pracy powoduje wymierne straty w sieci. Poza tym, kiedy współczynnik mocy jest mniejszy od jedności, to prąd pobierany z sieci jest odkształcony i pojawiają się składowe harmoniczne, które jak już wiemy, są również szkodliwe. Pomiar $\cos \varphi$ pozwala ocenić, czy nie jest konieczna jego kompensacja na stacjach energetycznych od strony zasilania. Może być również wskazówką dla projektantów odbiorników energii, jak poprawnie skompensować współczynnik mocy. Obecnie płacimy za pobraną moc czynną, ale być może pojawią się regulacje pozwalające obciążać odbiorców za moce bierne.

Pomiar częstotliwości sieci

Pomiar częstotliwości sieci jest ważnym parametrem monitorującym stan systemu energetycznego. Systemy zasilające większe lub mniejsze obszary mogą być podatne na przeciążenia i załamania. W krytycznych sytuacjach, kiedy zapotrzebowanie na moc gwałtownie rośnie, przeciążane są kolejne linie zasilające wysokich napięć. W wyniku przeciążenia aparatura zabezpieczająca wyłącza linię i zapotrzebowanie na moc zostaje przerzucone na kolejną linię. Ta również zostaje przeciążona i się wyłącza. Powstaje efekt domina i system energetyczny na określonym obszarze się załamuje. Tak może się zdarzyć na przykład w trakcie silnych mrozów lub upalnych dni (przeciążenie układami klimatyzacji).

Żeby temu zapobiec, stosuje się kryterium częstotliwościowe. Zbyt duże obciążenie generatorów w elektrowni powoduje, że nie mogą one utrzymać zadanej prędkości wirowania i częstotliwość napięcia spada. Odbiorcy energii są dzieleni na kategorie i ci mniej ważni są odłączani od sieci w momencie, kiedy częstotliwość spadnie o niewielką wartość. Jeżeli częstotliwość dalej spada, odłączani są kolejni odbiorcy. Obciążenie spada i częstotliwość rośnie. Wtedy służby energetyczne decydują, czy można przywrócić zasilanie grupom odbiorców. Zapobiega to załamaniu się systemu energetycznego. Kryterium częstotliwościowe stosuje się również w układach zabezpieczenia generatorów.

Przyrządy pomiarowe pokazane wyżej mierzą częstotliwość sieci z określoną dokładnością i pozwalają ocenić, czy częstotliwość jest prawidłowa. Do wypracowania sygnału wyłączenia obciążenia zgodnie z kryterium częstotliwościowym stosowane są tak zwane



Fotografia 8. Przekazniki BEL_SCO i mBEL_SCO

przekazniki podczęstotliwościowe. Mogą to być autonomiczne urządzenia nazywane PCO lub SCO, lub funkcja wbudowana w zabezpieczenia cyfrowe. Przykładem przekaznika SCO są konstrukcje BEL_SCO i mBEL_SCO polskiej firmy Aparator (fotografia 8). Urządzenie może realizować funkcje automatycznego częstotliwościowego odciążania SCO i jest przeznaczone do zabezpieczania jednostek wytwórczych (blok generator–transformator), detekcji stanu zagrożenia utraty częstotliwości w systemie energetycznym oraz zabezpieczenia sieci SN, WN i NN. Oprócz SCO wbudowano tu szereg innych funkcji, takich jak rejestrator zakłóceń, dziennik zdarzeń i możliwość komunikacji z systemem nadrzędnymi za pomocą łączności radiowej GPRS, Tetra i Digicom 7.

Zabezpieczenia sieci

Pokazana aparatura pomiarowa mierząca parametry sieci ma za zadanie ich monitorowanie, wyświetlanie i ewentualnie przesyłanie do systemów nadzoru SCADA. Są to bardzo istotne pomiary pozwalające na monitorowanie systemów energetycznych na wszystkich poziomach od wytwórcy energii, poprzez przesyłanie (linie i stacje rozdzielcze), aż do końcowego odbiorcy.

W energetyce stosuje się, na szeroką skalę, aparaturę zabezpieczającą łączącą układy pomiarowe z logiką zabezpieczającą. Łatwo sobie wyobrazić, jakie skutki miałyby zwarcia w liniach energetycznych, gdyby nie stosowano układów wykrywających zwarcia i odłączających zwarte fragmenty sieci od zasilania. Uszkodzenia linii mogą mieć różne przyczyny. Jedną z głównych są zjawiska pogodowe: silne wiatry, duże opady śniegu, szadź itp. Szczególnie groźna może być szadź, która się osadza na przewodach i słupach energetycznych. Po wpływem jej ciężaru rwą się przewody i łamią słupy, powodując rozległe awarie. Uszkodzeniu ulegają również izolatory (starzenie, uszkodzenia mechaniczne) i ogólnie izolacja, na przykład kabli SN i NN, transformatorów, silników czy innych urządzeń.

Rozróżniane są dwa rodzaje zwarć: międzyfazowe i doziemne. Każde z nich ma swoją specyfikę i jest inaczej wykrywane. Zwarcie międzyfazowe powstaje po zwarceniu przewodów fazowych między sobą. Charakteryzuje się przepływem dużych prądów i wyzwoleniem dużej ilości energii. Z technicznego punktu widzenia jest łatwe do wykrycia, bo wystarczy zmierzyć prąd i jeżeli jego wartość osiągnie zadany próg, to zabezpieczenie zadziała, odłączając zwarty odcinek linii. W obwodach pomiarowych wykrywających zwarcia powinno się stosować przekładniki prądowe specjalnie przeznaczone do tego celu. Krzywa magnesowania powinna być liniowa w zakresie prądów wielokrotnie przekraczających zakres prądów roboczych. Dokładność pomiaru w zakresie prądów roboczych nie jest tu istotna tak, jak w przekładnikach przeznaczonych do pomiaru prądów roboczych.

Drugim rodzajem zwarcia jest zwarcie przewodu fazowego z ziemią. W pewnych rodzajach sieci prąd zwarcia może być mniejszy od prądów roboczych i kryterium prądowe zakładające, że prąd zwarcia jest

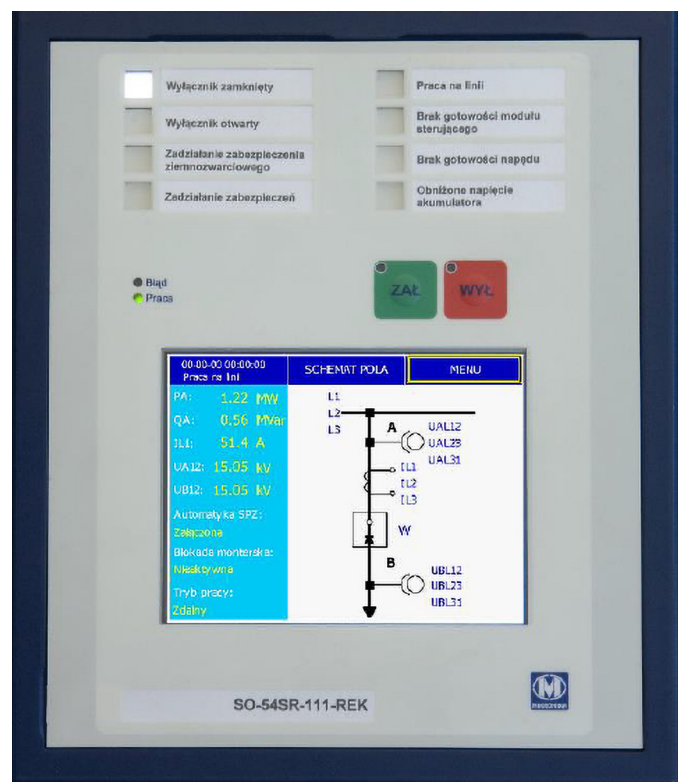
wielokrotnie większy od prądów roboczych, się nie sprawdzi. Dlatego stosuje się inne metody wykrywania takich zwarć.

Układy zabezpieczeń w sieci SN – smart grid

W ostatnich latach szczególnego znaczenia nabiera automatyka smart grid realizowana w głębi sieci średniego napięcia SN. Ta sieć jest najbardziej rozległa i najbardziej narażona na uszkodzenia. Prawo nakłada na dystrybutorów energii obowiązek skutecznego ograniczania przerw w dostarczeniu energii. Żeby się z tego wywiązać, stosuje się układy wykrywania przepływającego prądu zwarciego – sygnalizatory zwarć. Sygnalizatory mogą tylko wykryć zwarcie i przekazać tę informację drogą radiową do systemu nadrzędnego lub zaleźnie od podłączonej do nich aparatury łączeniowej automatycznie dodatkowo odłączać uszkodzony odcinek linii w przerwie beznapięciowej. Możliwe jest też wyłączanie prądów zwarciegich przez specjalne aparaty wyposażone w komory próżniowe lub komory ze specjalnym gazem gaszącym łuk elektryczny. Żeby wykryć zwarcie, trzeba zmierzyć prąd przepływający przez linię. Algorytmy wykrywania zwarć są bardziej precyzyjne, kiedy jednocześnie mierzy się napięcie we wszystkich trzech fazach.

W systemach smart grid najbardziej funkcjonalnym, ale równocześnie najbardziej kosztownym elementem jest reklozer. To zespół sterownik–aparat łączeniowy, który oprócz wykrywania zwarć, może również wyłączać linię i załączać ją na zwarcie. Załączanie na zwarcie ma na celu usunięcie zwarcia na linii spowodowanego przez ptaki, spadające gałęzie, lodygi itp. Przepływający prąd zwarciegowy potrafi spalić przyczynę zwarcia i linię można szybko ponownie załączyć do pracy. Układ sterownika ma za zadanie wykryć zwarcie i jego rodzaj oraz wykonać cykl łączy na zwarcie. Jeżeli po określonej liczbie cykli zwarcie jest dalej aktywne, to linia jest definitywnie wyłączana.

Przykładem sterownika wyposażonego w układy pomiarowe i automatykę zabezpieczeń jest SO-54SR-111 REK produkcji polskiej firmy Mikronika (fotografia 9). Urządzenie jest wyposażone w panel sterujący z graficznym wyświetlaczem LCD zintegrowanym z panelem dotykowym. SO-54SR-111-REK mierzy trzy prądy fazowe za pomocą



Fotografia 9. Sterownik SO-54SR-111-REK produkcji polskiej firmy Mikronika



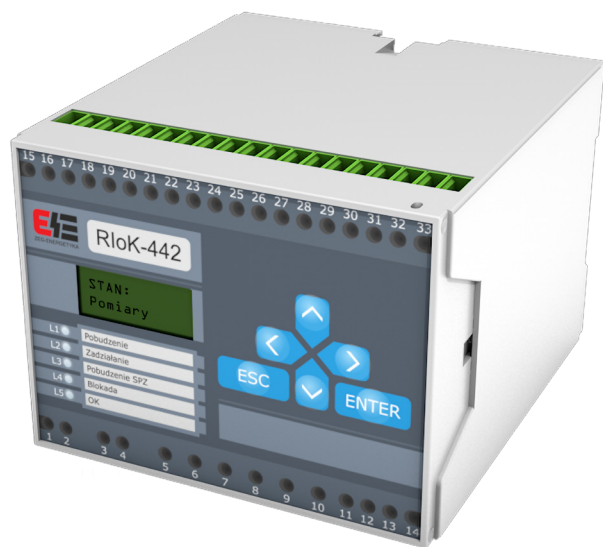
Fotografia 10. Sterownik SO-54SR-3xx produkcji polskiej firmy Mikronika

cewek Rogowskiego. Na podstawie tych pomiarów jest wyznaczany prąd 3I0. Do pomiaru napięć na liniach wykorzystuje się dzielniki pojemnościowe. Układ mierzy 6 napięć: 3 napięcia fazowe od strony zasilania i 3 napięcia fazowe od strony obciążenia. Na podstawie tych pomiarów jest wyznaczane napięcie 3U0. Zabezpieczenie nadprądowe (zwarcie międzyfazowe) może mieć progi wyzwalań z zakresu od 20 A do 2000 A. Dodatkowo jest definiowany czas, przez jaki może trwać zwarcie (od momentu wykrycia do momentu ustąpienia lub wyłączenia wyłącznika). Zabezpieczenie ziemnozwarciowe może być wykrywane według kilku wariantów: biernomocowe, czynnomocowe, admitancyjne kierunkowe i bezkierunkowe. W układ wbudowano też zabezpieczenia podczęstotliwościowe, nadnapięciowe i podnapięciowe.

Urządzenie SO-54SR-111-REK jest konfigurowane przez firmowy program pConfig. Prawidłowe skonfigurowanie pracy zabezpieczenia współpracującego z reklozerem, pracującego w głębi sieci SN, wymaga sporej wiedzy i doświadczenia. Instalacja reklozera jest stosunkowo droga i jest umieszczana w sieci w miejscach pozwalających na jak najszybsze automatyczne usunięcie zwarcia lub wyłączenie uszkodzonego odcinka sieci. System wyszukiwania zwarcia w sieci jest wspomagany przez prostsze i o wiele tańsze układy sygnalizatorów zwarc, które mogą być połączone ze sterowanymi odłącznikami mogącymi odłączać fragmenty uszkodzonej sieci w przerwie beznapięciowej. Sygnalizatory zwarc mierzą przepływający prąd w fazach linii przesyłowych i potrafią wykrywać zwarcia międzyfazowe lub doziemne. Są również warianty z układem pomiaru napięć fazowych z pojemnościowymi sensorami napięcia.

Przykładem takiego sterownika jest SO-54SR-3xx (**fotografia 10**) spełniający funkcje pomiarowe, sterownicze, telemechaniki, sygnalizatora zwarc, sekcjonalizera i rejestratora zakłóceń. Zależnie od wersji prąd w fazach może być mierzony przez przekładniki prądowe lub cewki Rogowskiego. Do pomiaru napięcia w trzech fazach wykorzystuje się sensory z dzielnikami reakcyjnymi. Na podstawie tych pomiarów odbywa się detekcja zwarc według kryteriów: nadprądowego (międzyfazowe i doziemne), admitancyjnego, konduktancyjnego i suseptancyjnego (doziemne).

W liniach wysokich napięć stosuje się również zabezpieczenia przed zwarciami. Działają na takiej samej zasadzie, jak opisywane wyżej zabezpieczenia sieci średnich napięć. Ze względu na specyfikę rozdzielni



Fotografia 11. Zabezpieczenie ziemnozwarciowe RloK-442 produkcji polskiej firmy ZEG Energetyka Tychy

WN zabezpieczenia mogą być specjalizowane i przeznaczone do konkretnych pól rozdzielni, jak na przykład zabezpieczenie linii WN, zabezpieczenie transformatora, szyn zbiorczych itp. Przykładem może być zabezpieczenie ziemnozwarciowe RloK-442 produkcji ZEG -Energetyka Tychy przeznaczone do ochrony sieci wysokiego napięcia przed skutkami zwarć jednofazowych z ziemią (**fotografia 11**).

Zaprezentowana aparatura pomiarowa wykonuje głównie pomiary napięć i prądów oraz częstotliwości i zniekształceń harmonicznych.



Fotografia 12. Licznik energii Apator smartESOX P

Te pomiary skupiają się w dwu grupach zastosowań: pomiarów jakości energii oraz pomiarów do celów zabezpieczeń sieci energetycznej i generatorów przed skutkami zwarć i przeciążeń. To bardzo ważne elementy niezbędne do właściwej diagnostyki sieci energetycznych i zapewnienia ciągłej dostawy energii. Pomiar napięć i prądów jest też wykorzystywany w celu zliczania sprzedanej energii. Liczniki energii elektrycznej są montowane nie tylko u odbiorców końcowych, ale też na stacjach energetycznych czy w elektrowniach. Liczniki wykorzystują do pomiaru prądów i napięć podobne sensory jak już opisane wyżej. Do rozliczeń energii muszą się charakteryzować odpowiednią klasą dokładności. W gospodarstwach domowych i pewnie nie tylko spotyka się jeszcze stare elektromechaniczne liczniki z wirującą tarczą i mechanicznym liczydłem, ale są one coraz liczniej zastępowane przez liczniki elektroniczne. Liczniki elektroniczne są trwalsze i tańsze w produkcji, bo nie wymagają wykonywania drogich elementów mechaniki precyzyjnej. Elektronika zapewnia możliwość zdalnego odczytu przez łącza radiowe, na przykład GSM/GPRS.

W instalacjach OZE, na przykład fotowoltaicznych, konieczne jest stosowanie dwukierunkowego pomiaru energii czynnej. Kiedy właściciel instalacji produkuje więcej energii, niż potrzebuje, to jest ona oddawana do sieci energetycznej i licznik musi to potrafić zliczyć. Przykładem nowoczesnego licznika o dużych możliwościach jest smartESOX P produkowany przez firmę Apator (**fotografia 12**). Licznik potrafi zliczać energię czynną, bierną i pozorną oraz mierzyć moce chwilowe, maksymalne i nadmiarowe. Ma też funkcje spotykane w miernikach jakości sieci, czyli pomiary napięć, prądów, harmoniczných napięć i prądów, łącznie z wyliczaniem współczynnika zniekształceń THD, obniżenia i podwyższenia napięcia. Całość uzupełnia funkcja rejestratora zdarzeń oraz porty komunikacyjne i radiowe moduły komunikacji GSM. Tego typu liczniki mogą być montowane w sieciach niskiego, średniego i wysokiego napięcia.

Pomiary związane z bezpieczeństwem

Kolejną bardzo ważną grupą pomiarów i związaną z nimi aparaturą pomiarową są pomiary związane z bezpieczeństwem eksploatacji instalacji energetycznych: rezystancji izolacji za pomocą wysokiego napięcia, rezystancji uziemienia rezystancji gruntu, poprawnego działania wyłączników różnicowo-prądowych oraz rezystancji pętli zwarcia.

Firma Sonel produkuje wielofunkcyjny miernik parametrów izolacji MPI-525 (**fotografia 13**) mierzący:

- impedancję pętli zwarcia,
- rezystancję izolacji,
- rezystancję uziemienia,
- parametry wyłączników różnicowo-prądowych RCD,
- ciągłość połączeń ochronnych i wyrównawczych.

MPI-525 jest na tyle uniwersalny, że pomiary nim wykonane spełniają wymagania PN-EN 61557. Pomiar impedancji pętli zwarcia jest



Fotografia 13. Miernik parametrów izolacji MPI-525 firmy Sonel



Fotografia 14. Wysokonapięciowy tester izolacji S-36 VLF

wykonywany z rozdzielczością 0,01 Ω prądem 23 A i napięciem pomiarowym z zakresu 95...440 V. Pomiar parametrów wyłączników różnicowo-prądowych jest wykonywany automatycznie i obejmuje cały cykl pomiarów łącznie z pomiarem rezystancji pętli zwarcia L-PE. Pomiar rezystancji izolacji jest wykonywany w zakresie do 10 G Ω napięciami pomiarowymi od 50 do 2500 V. Rezystancja uziemienia jest wykonywana metodą techniczną 3-przewodową z 2 elektrodami pomocniczymi. MPI-525 jest przeznaczony do pomiarów w sieciach niskiego napięcia.

Firma Sonel oferuje również wysokonapięciowy tester izolacji S-36 VLF (**fotografia 14**) przeznaczony do testowania kabli średniego napięcia pracujących najczęściej z napięciem 15 kV. Tester jest przeznaczony do testowania kabli ŚN za pomocą napięcia VLF o bardzo niskiej częstotliwości 0,1 Hz. Ten sposób jest bardzo skuteczny w diagnostyce uszkodzeń izolacji. Napięcie wyjściowe można regulować w zakresie 0...36 kV RMS (do 51 kV peak). Prąd pomiarowy można ustawiać w trzech zakresach do 100 μ A, 1 mA i 10 mA. Są również inne wersje z maksymalnym napięciem wyjściowym do 57 kV RMS (S-57VLF).

Podsumowanie

Aparatura pomiarowa w energetyce to zarówno klasyczne mierniki tablicowe i przenośne, jak też i funkcje pomiarowe wbudowane w sterowniki telemechaniki i autonomiczne układy zabezpieczeń. Urządzenia pokazane w artykule to oczywiście tylko niewielka część olbrzymiej oferty różnych producentów skierowanej do serwisantów i służb utrzymania systemów energetycznych. Wszystkie przykłady pokazanych urządzeń łączy jedna cecha – są projektowane i produkowane przez polskie firmy. To celowy zabieg zastosowany, żeby pokazać, że w tej ważnej dziedzinie techniki polskie firmy elektroniczne radzą sobie bardzo dobrze. Sonel, Apator-Elkomtech, Mikronika, LUMEL to tylko kilka przykładów firm projektujących i produkujących zaawansowane urządzenia pomiarowe. Trzeba sobie zdawać sprawę, że rynek energetyki obejmujący zarówno dystrybutorów energii, jak i odbiorców energii jest bardzo wymagający, bo wadliwie działające urządzenia pomiarowe mogą spowodować olbrzymie straty materialne i spowodować niebezpieczeństwo na ludzi pracujących przy eksploatacji urządzeń energetycznych. W naszym kraju powstają również bardzo zaawansowane systemy nadzoru typu SCADA, systemy automatycznego wyszukiwania i izolowania uszkodzonego fragmentu sieci FDIR. Są one kupowane i wdrażane na dużą skalę przez spółki dystrybucyjne i elektrownie i to przy dużej konkurencji światowych gigantów elektroniczno-informatycznych.

Tomasz Jabłoński
tomasz.jablonski@ep.com.pl