

Kompatybilność elektromagnetyczna w zakresie niskich częstotliwości

W artykule przedstawiamy coraz bardziej istotne dla elektroników zagadnienia związane z kompatybilnością elektromagnetyczną (EMC) w zakresie niskich częstotliwości. Autor pokrótce omawia najważniejsze normy określające zarówno reguły pomiaru zakłóceń niskoczęstotliwościowych emitowanych przez urządzenia elektryczne, jak i sposoby testowania odporności tychże urządzeń na zakłócenia. W dalszej części autor prezentuje zintegrowane urządzenia pomiarowe służące do testowania odbiorników energii elektrycznej w zakresie określonym przez omówione normy EMC.



Normy i przyrządy pomiarowe

Obserwowany w ostatnich latach wzrost zainteresowania zagadnieniami kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń jest stymulowany zarówno wzrastającymi ciągle wymaganiami rynku, jak i ustaleniami instytucji standaryzacyjnych. Do tej pory szczególny nacisk kładziono na emisyjność urządzeń w zakresie częstotliwości radiowych oraz na ich odporność na zakłócenia w zakresie tych częstotliwości. Emisyjność i odporność urządzeń elektrycznych w zakresie niskich częstotliwości pozostawała w cieniu.

Rozprzestrzenianie się zarówno w przemyśle, jak i w gospodarstwach domowych odbiorników energii elektrycznej wyposażonych w zasilacze impulsowe oraz coraz powszechniejsze stosowanie regulatorów oświetlenia, których działanie opiera się na sterowaniu kątem przepływu prądu sprawia, że z jednej strony energia elektryczna jest efektywniej wykorzystywana, zaś z drugiej jej „jakość”, w sensie zachowania wartości nominalnych napięcia i częstotliwości, znacznie się pogarsza. Istnieje zatem potrzeba unormowania rodzajów i dopuszczalnych poziomów zakłóceń emitowanych przez urządzenia elektryczne podłączone do sieci publicznej oraz rodzajów i poziomów zakłóceń, na jakie urządzenia te muszą być odpor-

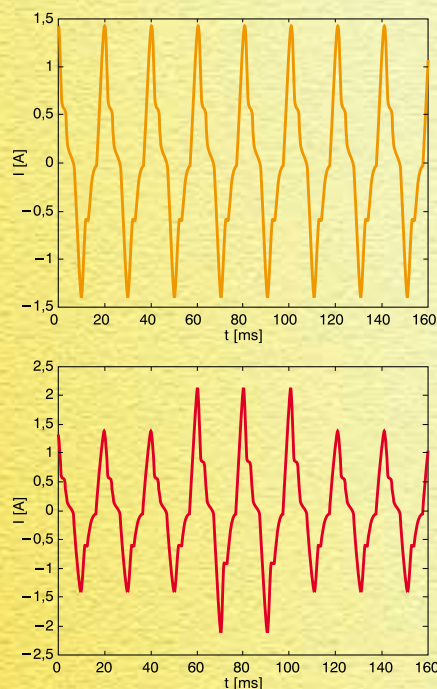
ne. Specyfikacja wymagań dotyczących odbiorników energii elektrycznej pociąga za sobą konieczność określenia metod ich weryfikacji oraz konfiguracji systemów pomiarowych, które tę weryfikację umożliwią. Odpowiednie normy zawierają opisy metod pomiarowych, specyfikację wymagań odnośnie przyrządów pomiarowych, a nawet sposoby ich implementacji. Konstruktorom systemów pomiarowych pozostaje jedynie tworzenie oprogramowania pomiarowego, które pozwoli przeprowadzić określone w standardach testy w sposób możliwie łatwy do szybkiego wykonania w różnych fazach projektowania i produkcji urządzeń elektrycznych.

W artykule przedstawiono normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej w zakresie niskich częstotliwości oraz przyrządy serii 6800 AC Power Source/Analyzers (Agilent Technologies), pozwalające na w pełni zautomatyzowane wykonywanie testów zgodności z tymi standardami.

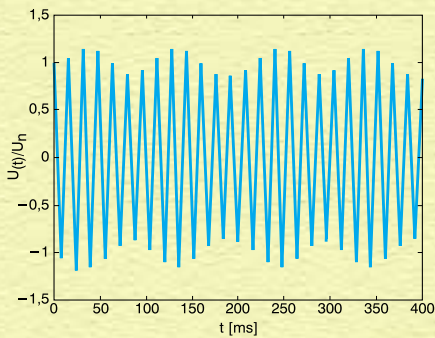
Emisyjność urządzeń elektrycznych w zakresie niskich częstotliwości

Emisyjność urządzeń elektrycznych w zakresie niskich częstotliwości regulują dwie normy: IEC1000-3-2 oraz

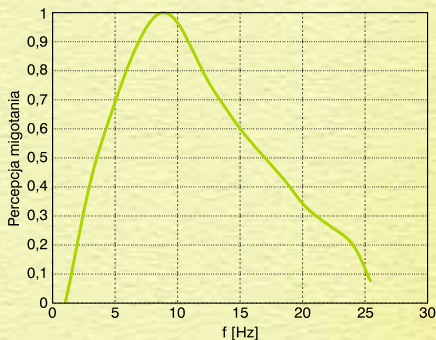
IEC1000-3-3. Pierwsza z nich określa dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu przez odbiorniki podłączone



Rys. 1.



Rys. 2.



Rys. 3.

do sieci publicznej, których prąd fazowy jest mniejszy od 16A - granice zdefiniowane są dla 40 harmoniczných. W normie tej podano klasy odbiorników energii i indywidualnie dla każdej z nich podano limity emisji harmoniczných prądu. Specyfikuje się w nim również wymagania dotyczące przyrządów pomiarowych używanych do testów zgodności, tzn. źródła AC oraz analizatora harmoniczných.

Harmoniczných prądu są emitowane do sieci zasilającej przez urządzenia elektryczne wyposażone w zasilacze impulsowe lub regulatory z kontrolą kąta przepływu prądu. Kształt przebiegu prądu przepływającego przez tego typu odbiorniki odbiega mocno od sinusoidalnego. Ograniczenia zawartości harmoniczných określone w normie IEC1000-3-2 definiują dopuszczalny poziom takiego odkształcenia. Obecność harmoniczných prądu wpływa niekorzystnie na „jakość” dostarczanej do urządzeń mocy elektrycznej, co objawia się następująco:

- do odbiorników włączonych do sieci nie jest dostarczana moc czynna przy znacznej wartości skutecznej przepływającego prądu,
- wzrasta prąd zerowy odbiorników trójfazowych,
- urządzenia podłączone do tej samej gałęzi sieci co odbiornik emitujący harmoniczných narażone są na zakłócenia napięcia wynikające z interakcji harmoniczných z impedancjami w systemie dystrybucyjnym.

W normie IEC1000-3-2 wyróżnione są dwie klasy zniekształceń powodowanych przez odbiorniki emitujące harmoniczných prądu do sieci zasilającej: quasi-stacjonarne oraz zmienne (niestacjonar-

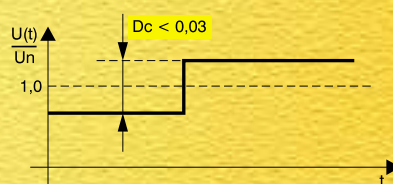
ne) zniekształcenia harmoniczne. Pierwsze są wytwarzane przez urządzenia elektryczne, które stanowią stałe obciążenie sieci - amplitudy poszczególných harmoniczných nie zmieniają się w czasie. Takie zniekształcenia powodują między innymi monitory komputerowe. Z kolei źródłem niestacjonarných zniekształceń harmoniczných są urządzenia stanowiące zmienne obciążenie sieci zasilającej, np.: kuchenki mikrofalowe, zmywarki, drukarki i fotokopiarki. Norma IEC1000-3-2 określa dwie oddzielne metodologie pomiaru emisji harmoniczných prądu dla obydwu klas. Przykłady przebiegów prądu z quasi-stacjonarnymi i niestacjonarnymi harmonicznymi pokazano na rys. 1.

Oprócz odbiorników, które wpływają nieliniowo na przepływ prądu, niekorzystnie na parametry napięcia w sieci zasilającej oddziałują urządzenia z automatycznym włączaniem i wyłączaniem zasilania, takie jak termostaty i timery. Częste zmiany obciążenia w gałęziach powodują wahania napięcia skutecznego, co z kolei prowadzi do migotania oświetlenia.

Znaczące zmiany intensywności oświetlenia występują nawet przy małych zmianach napięcia zasilającego, ponieważ intensywność jest proporcjonalna do kwadratu wartości napięcia skutecznego. Migotanie jest irytujące dla człowieka, a w skrajnych przypadkach (np. chorzy na epilepsję) może prowadzić do zagrożenia zdrowia. Stąd też pojawiła się konieczność określenia dopuszczalnych poziomów wahań napięcia i migotania oświetlenia, jakie mogą być wprowadzane przez odbiorniki energii elektrycznej. Ograniczenia te zostały zawarte w normie IEC1000-3-3. Norma ta definiuje również wymagania dotyczące samego pomiaru migotania oraz przyrządów pomiarowych używanych do tego pomiaru, czyli źródła AC i impedancji referencyjnej.

Zgodność z normą IEC1000-3-3 gwarantuje, że wahania napięcia powodowane przez testowane urządzenie nie wpływają na pracę innych odbiorników podłączonych do sieci oraz nie powodują migotania światła, które mogłyby być irytujące dla człowieka.

Typowym modelem wahań napięcia w sieci zasilającej jest przebieg sinusoidalny o częstotliwości 50Hz zmodulowany amplitudowo sygnałem o pasmie częstotliwości w zakresie od ułameków Hz do około 25Hz. Przykładowy przebieg wahań napięcia pokazano na rys. 2. Pasma sygnału modulującego wynika ze zdolności percepcyjnych człowieka.

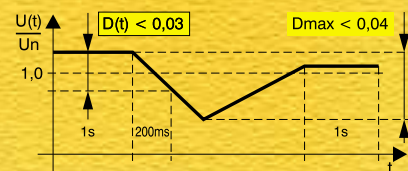


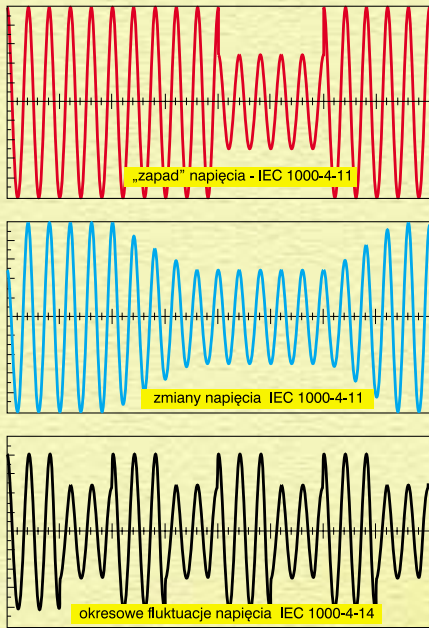
Rys. 4.

Fluktuacje o częstotliwości powyżej 25Hz są dla ludzi niezauważalne. Najsilniej odbierane jest natomiast migotanie o częstotliwości 8,8Hz. Krzywą ludzkiej percepcji migotania przedstawia rys. 3.

W odniesieniu do ludzkiego postrzegania migotania, definiowane są w normie IEC1000-3-3 parametry, które są mierzone i poddawane ocenie. Pierwszy z nich to krótkookresowe migotanie (ang. short-term flicker) - *Pst*. Jeśli odwołamy się do przedstawionego powyżej prostego modelu wahań napięcia, to powiemy, że parametr *Pst* zależy od częstotliwości przebiegu modulującego, głębokości modulacji oraz czasu trwania fluktuacji napięcia. Typowy czas pomiaru krótkookresowego migotania wynosi 10 minut. Dopuszczalna przez normę wartość parametru *Pst* wynosi 1. Jest to jednocześnie średni próg dokuczliwości migotania. Drugi parametr - długookresowe migotanie (ang. long-term flicker) *Plt* - obliczany jest na podstawie 2-godzinnego monitorowania parametru *Pst*. Dopuszczalny poziom definiowany przez normę wynosi 0,65. Jest intuicyjnie wyczuwalne, że coś bardziej uciążliwego możemy znieść w krótszym czasie, dlatego wymagania na wartość długookresowego migotania jest ostrzejsze. Odbiorniki energii elektrycznej, które powodują wahania napięcia z powodu włączania bądź wyłączania, nie mogą być ocenione za pomocą parametrów *Pst* i *Plt*, gdy proces ten zachodzi rzadziej niż raz na godzinę. Dlatego definiuje się dodatkowe parametry. Względna zmiana napięcia stanów ustalonych (ang. relative steady-state voltage change) *Dc* definiowana jest jako różnica między dwoma sąsiednimi stanami ustalonymi napięcia w odniesieniu do jego wartości nominalnej. Dopuszczalny przez normę limit wynosi 3%. W normie określona jest charakterystyka względnych zmian napięcia *D(t)*. Jest ona definiowana jako zmiana napięcia skutecznego względem wartości nominalnej w funkcji czasu, a pomiary są wykonywane pomiędzy okresami, kiedy napięcie jest w stanie ustalonym przez co najmniej 1 sekundę. Względne zmiany wartości napięcia trwające w sposób ciągły przez 200ms nie mogą przekroczyć 3%.

Kolejny parametr z tzw. klasy „D”, to maksymalna względna zmiana napięcia *Dmax*. Stanowi on różnicę między maksymalną i minimalną wartością skuteczną napięcia w okresach czasu zdefiniowanych dla charakterystyki *D(t)* odniesioną do wartości nominalnej. *Dmax* nie może przekroczyć 4%. Ilustrację definicji parametrów *D* przedstawiono na rys.





Rys. 5.

4. Wszystkie wymienione tu parametry kontroluje się za pomocą miernika migotania, którego implementacja jest dokładnie opisana w normie IEC868, zaś krótko zostanie przedstawiona w dalszej części artykułu.

Odporność urządzeń elektrycznych w zakresie niskich częstotliwości

Sposoby testowania odporności urządzeń na zakłócenia w zakresie niskich częstotliwości opisane są w następujących normach:

- IEC1000-4-11 - odporność urządzeń na zapady, krótkie przerwy i zmiany napięcia,
- IEC1000-4-14 - odporność urządzeń na okresowe fluktuacje napięcia,
- IEC1000-4-28 - odporność urządzeń na zmiany częstotliwości napięcia zasilającego,
- IEC1000-4-13 - odporność urządzeń na obecność harmonicznych oraz interharmonicznych w przebiegu napięcia sieci zasilającej.

Wyżej wymienione normy definiują sekwencje zakłóceń napięcia zasilającego, które należy podać na zaciski badanego urządzenia. Przykładowe przebiegi zakłóceń pokazano na rys. 5.

Test zgodności odbiornika energii z odpowiednią normą polega na zasilaniu go przez pewien okres napięciem zawierającym sekwencję zakłóceń zdefiniowaną w normie, a następnie na sprawdzeniu, czy działa on w dalszym ciągu poprawnie, czy też jego funkcjonalność uległa degradacji w wyniku uszkodzenia komponentów lub oprogramowania. Ponieważ badaniom poddawane są różnorodne urządzenia, ocena czy urządzenie przeszło test pomyślnie, czy też nie, może być dokonana dwoma sposobami. Pierwszy z nich, to ocena operatora wykonującego badania. Po przeprowadzeniu

testu odporności stwierdza on, czy urządzenie jest dalej sprawne, czy nie nadaje się do dalszej eksploatacji i swoją ocenę wpisuje w odpowiednią rubrykę raportu. Drugi sposób jest w pełni automatyczny. Konfiguruje się i oprogramuje system pomiarowy, którego zadaniem jest jednoczesne wygenerowanie wymuszenia (odpowiedniego przebiegu zaburzonego napięcia zasilającego) dla badanego odbiornika i pomiar jego odpowiedzi. Analiza odpowiedzi odbiornika na sekwencję zakłóceń stanowi podstawę do zakwalifikowania urządzenia jako zgodnego z danym standardem lub niespełniającego jego wymagań.

Wykonanie badań zgodności z normami dotyczącymi odporności na zakłócenia w zakresie niskich częstotliwości wymaga dysponowania co najmniej źródłem napięcia zmiennego, które ma możliwość generowania definiowanych przez użytkownika przebiegów odkształconych. Wykonanie testu w sposób automatyczny wymaga dodatkowo posiadania oprzyrządowania do pomiarów odpowiedzi urządzenia, np. oscyloskopu o dobrych parametrach.

System do pomiarów kompatybilnościowych w zakresie niskich częstotliwości firmy Agilent Technologies - 6800 AC Power Source/Analyzers

Systemy Agilent 6800 AC Power Source/Analyzers stanowią kompleksowe rozwiązanie umożliwiające pomiary zarówno emisyjne, jak i odporności urządzeń w zakresie niskich częstotliwości.

Prezentację przyrządów serii 6800 rozpoczniemy od przedstawienia schematów blokowych systemów pomiarowych przeznaczonych do przeprowadzania testów zgodności z normami IEC1000-3-2 i IEC1000-3-3 (rys. 6 i rys. 7). W obydwu przypadkach testowany odbiornik zasilany jest z precyzyjnego źródła napięcia zmiennego. W przypadku pomiaru zawartości harmonicznych, w obwód prądowy włączony jest bocznicnik napięcie o kształcie takim, jaki jest kształt płynącego w obwodzie prądu. Napięcie to podawane jest na wejście analizatora harmonicznych, który mierzy amplitudy kolejnych harmonicznych w jego przebiegu.

Gdy testujemy odbiornik energii elektrycznej pod względem zgodności z normą IEC1000-3-3, w obwód prądowy włączana jest impedancja referencyjna, której zadaniem jest symulowanie linii przesyłowej. Impedancja ta jest określona w normie IEC725 i ma charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Do zacisków źródła podłączony jest miernik migotania, którego zadaniem jest pomiar parametrów *Pst*, *Plt* oraz parametrów typu *D*.

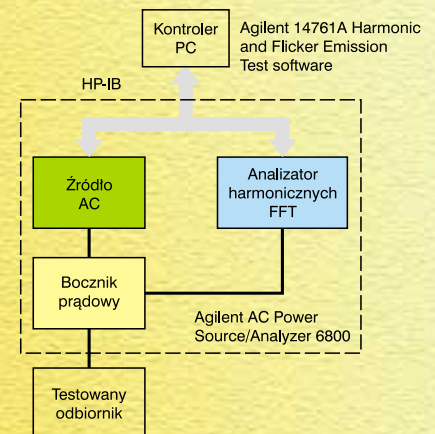
W urządzeniach 6812B, 6813B, 6843A firmy Agilent Technologies precyzyjne

Tab. 1.

Norma IEC	Oprogramowanie
1000-3-2 1000-3-3	14761A: Harmonic and Flicker Emission Tests
1000-4-11 1000-4-14 1000-4-28	14762A: Voltage and Frequency Disturbances Immunity Tests
1000-4-13	14763A: Interharmonics Immunity Test

źródło AC, bocznicnik prądowy, impedancja referencyjna, analizator harmonicznych oraz miernik migotania zintegrowane są w jednym przyrządzie pomiarowym (por. rys. 6 i 7). Źródło AC posiada możliwość generowania przebiegów zdefiniowanych przez użytkownika, co pozwala na wykonywanie testów odpornościowych.

Przyrządy serii 6800 posiadają również możliwości pomiarowe (funkcja oscyloskopu cyfrowego), umożliwiające ocenę odpowiedzi odbiornika energii poddanego testowi odpornościowemu. Integracja wszystkich potrzebnych funkcji pomiarowych w jednym urządzeniu nie tylko zwiększa jego walory użytkowe, ale umożliwia również uzyskanie dużych dokładności pomiaru. Jako przykład można podać synchronizację okna pomiarowego z początkiem przebiegu prądu (przecięcie zera) w przypadku pomiaru zawartości harmonicznych. Analizator harmonicznych w przyrządach serii 6800 wykorzystuje algorytm FFT z oknem prostokątnym lub oknem Hanninga. Przetwarzane są bloki o długości 4096 próbek. Dokładność pomiaru harmonicznych w przypadku zastosowania okna prostokątnego będzie bardzo dobra, jeśli zostaną spełnione dwa warunki: (1) wewnątrz okna pomiarowego znajdzie się całkowita liczba okresów podstawowej harmonicznej oraz (2) zostanie zapewniona precyzyjna synchronizacja początku cyklu przebiegu z początkiem okna. Spełnienie tych dwóch warunków zniweluje wpływ relatywnie wysokich listków bocznych okna prostokątnego na wynik pomiaru zawartości harmonicznych w przebiegu prądu. Norma IEC1000-3-2 określa dokładności synchronizacji co najmniej na poziomie



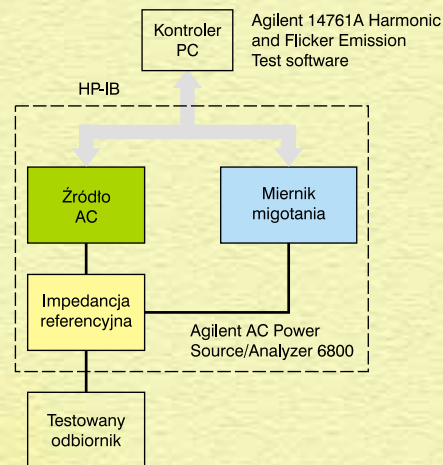
Rys. 6.

0,03%. Przyrządy 6800 AC Power Source/Analyze zapewniają tę synchronizację na poziomie 0,25ppm. Tak dobra dokładność jest możliwa dzięki doprowadzeniu do źródła AC i pozostałej części systemu pomiarowego tego samego sygnału zegarowego.

Miernik migotania w przyrządach 6800 zaimplementowano zgodnie z opisem w normie IEC868. Generalnie rzecz ujmując, miernik ten jest specjalizowanym demodulatorem i analizatorem AM, który pracuje z nośną o częstotliwości

sieci zasilającej. Uproszczony schemat blokowy tego przyrządu przedstawia rys. 8. Po unormowaniu i demodulacji sygnał trafia do systemu symulacji ścieżki lampa-oko-mózg, którego zadaniem jest wyznaczenie chwilowego poziomu migotania IFL (ang. instantaneous flicker level) na podstawie sygnału zmian napięcia otrzymanego na wyjściu demodulatora. System symulacji składa się z pasmowo-przepustowego filtra wejściowego - przepuszcza tylko napięcia o zauważalnej przez człowieka częstotliwości wahań, filtru o kształcie charakterystyki zgodnym z krzywą ludzkiej percepcji migotania oraz bloku podnoszenia wartości napięcia sygnału do kwadratu. Obecność ostatniego bloku w rozważanym systemie wynika z kwadratowej zależności intensywności świecenia lampy w zależności od wartości skutecznej napięcia. Zadaniem bloku analizy statystycznej jest wytworzenie histogramu wartości parametru IFL podczas trwającego 10 minut okresu monitorowania i wyliczenie na jego podstawie krótkookresowego migotania *Pst*. Ostatni blok ma oczywiste zadanie wyświetlenia lub/i rejestracji wyniku pomiaru.

Przyrządy Agilent 6800 Power Source/Analyze pozwalają na pełną automatyzację badań kompatybilnościowych w zakresie niskich częstotliwości. Uzyskuje się ją przez połączenie przyrządu 6800 magistralą HP-IB z komputerem, na którym instaluje się odpowiednie oprogramowanie. Firma Agilent oferuje trzy moduły oprogramowania służącego do automatycznego testowania odbiorników energii elektrycznej w omawianym tutaj zakresie. Moduł Agilent 14761A Harmonic and Flicker Tests umożliwia wykonywanie testów zgodności urządzeń z normami IEC1000-3-2 i IEC1000-3-3. Oprogramowanie to jest standardowo dostarczane z najsilniejszym przyrządem se-



Rys. 7.

rii 6800 - Agilent 6843A (4800VA). Do wykonania pełnych zautomatyzowanych badań odporności urządzeń na zakłócenia niskoczęstotliwościowe użytkownik potrzebuje dwóch dodatkowych modułów oprogramowania. Ich symbole i nazwy podano w tab. 1.

Przyrządy 6812B, 6813B oraz 6843A, z odpowiednimi modułami oprogramowania, stanowią kompletne systemy do badań kompatybilnościowych w zakresie niskich częstotliwości. Duże możliwości źródła AC (możliwość generacji zakłóceń, które nie są specyfikowane w omawianych tu standardach, takie jak szumy czy obciążony sygnał sinusoidalny) oraz możliwości łatwego i szybkiego wykonywania testów sprawiają, że urządzenia te są atrakcyjnym narzędziem zarówno dla inżynierów opracowujących nowe urządzenia, jak i dla ekip pracujących na liniach technologicznych fabryk produkujących masowo urządzenia elektryczne.

Jacek Falkiewicz,
AM Technologies Polska
jacek.falkiewicz@am-tech.pl



Rys. 8.