

Jerzy KERN, Piotr MACHALICA

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT ELEKTRONIKI, DŁUGA 44/50, 00-241 WARSZAWA,

Procedura weryfikacji metrologicznej potokowego, zautomatyzowanego systemu do kontroli przemysłowych wyrobów elektrycznych

dr inż. Jerzy KERN

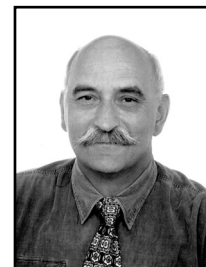
Główny specjalista badawczo-techniczny w Przemysłowym Instytucie Elektroniki, członek Sekcji Systemów Pomiarowych Komitetu Metrologii PAN-2000-2006. W 1963 ukończył studia na Wydziale Łączności PW, od 1971 pracuje w PIE, w 1982 uzyskał stopień doktora n.t. w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej. Tematyka badawcza – diagnostyka cyfrowych systemów pomiarowych, metody projektowania systemów pomiarowych,



e-mail: jotkern@pie.edu.pl

Mgr inż. Piotr MACHALICA

Straszy specjalista badawczo-techniczny, pracuje w Przemysłowym Instytucie Elektroniki od 1971r. W 1967 ukończył studia na Wydziale Elektroniki PW. Tematyka badawcza: automatyzacja procesów pomiarowych, pomiary półprzewodników, projektowanie systemów pomiarowych.



e-mail: piomach@pie.edu.pl

Streszczenie

Referat przedstawia rozwiązanie problemu weryfikacji funkcjonalnej i metrologicznej zautomatyzowanego systemu do testowania wyrobów elektrycznych, systemu o podwyższonych wymaganiach z zakresu wydajności i wiarygodności wyników oceny wyrobów. Procedura, opracowana w oparciu o analizę niezawodnościową i opracowany zbiór etalonów, modelujących parametry testowanych obiektów, integruje dwie techniki diagnostyczne - współbieżne, permanentne monitorowanie stanów połączeń przemieszczanych głowic pomiarowych; oraz -okresową diagnostykę, w postaci dwu różnych działań -weryfikacji funkcjonalnej oraz weryfikacji niepewności pomiarowych systemu.

Słowa kluczowe: system pomiarowy, weryfikacja metrologiczna

The metrological verification procedure of automatic testing system for industrial electrical products

Abstract

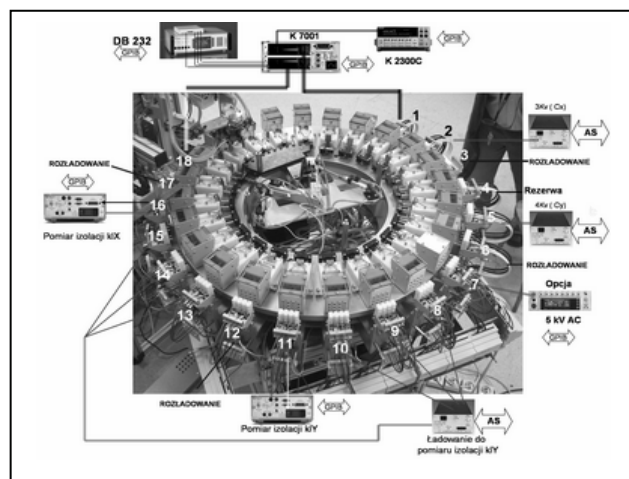
The paper presents the solution of the functional and metrological verification of the automatic system, developed for testing electrical products. The system is characterized by high speed of testing and high level of classification quality. The procedure is developed on the basis of reliability analyses and a special set of etalons, designed for modelling the characteristic of the product under test. The verification procedure integrates two diagnostic methods – concurrent, permanent monitoring of the states of moving test head connectors, and periodic diagnostics – in a form of two different activities- functional verification and metrological verification.

Keywords: measurement system, metrological verification.

1. Ogólna charakterystyka potokowego systemu kontrolnego

Zwiększanie konkurencyjności produktów na rynkach światowych powoduje wzrost wymagań w stosunku do wiarygodności przemysłowych systemów pomiarowych, co za tym idzie do minimalizowania wadliwości oceny parametrów kontrolowanych produktów. Poniżej przedstawiono przypadek procedury komputerowej, opracowanej w Przemysłowym Instytucie Elektroniki dla weryfikacji potokowego, zautomatyzowanego systemu kontrolnego, stosowanego w linii produkującej podzespoły elektryczne. Pojęcie systemu kontrolnego potokowego, oznacza w tym przypadku taki system o dużej wydajności, w którym kontrola wszystkich parametrów wyrobów odbywa się równocześnie dla całej grupy wyrobów, przy pomocy kilkunastu stanowisk.

Każde z tych stanowisk jest przeznaczone do sprawdzania innych parametrów. Badane wyroby są umieszczane w specjalnych, transportowanych automatycznie, w sposób potokowy głowicach, umożliwiających czteropunktowe pomiary na wyprowadzeniach elektrycznych testowanych obiektów. Rozpatrywany jest przypadek systemu do testowania produktów elektrycznych stosowanych w urządzeniach AGD i RTV. Wyroby takie wymagają, ze względów bezpieczeństwa, testowania w reżimie „zero braków”, co w praktyce sprowadza się do stosowania poziomu istotności oceny wyników na poziomie 50 ppm lub poniżej.



Rys.1 Weryfikowany automatyczny system testowania z transportem karuzelowym testowanych produktów

Fig. 1 The verified automatic testing system, with carousel transport of Tested Products

Rysunek 1 przedstawia widok przykładowego systemu kontrolnego opisywanego typu, z wykorzystaniem karuzelowego podsystemu transportu, przemieszczającego głowice pomiarowe z *Testowanymi Produktami (TP)* pomiędzy różnymi stanowiskami pomiarowymi. Stanowiska te, poprzez interfejs GPIB oraz adapter sygnałowy, są dołączone do komputerowego sterownika podsystemu pomiarowego. Poszczególne stanowiska kontrolują różne parametry, takie jak m.in. rezystancja izolacji, pojemności, indukcyjność, stratność dielektryczną, prąd zwarcia. Ta różnorodność pomiarów wymaga stosowania zaawansowanej technologii realizacji głowic pomiarowych, oraz wielu układów mechatronicznych związanych z pozycjonowaniem badanych elementów.

2. Wymagania weryfikacyjne jako wynik analizy niezawodności systemu

Zastosowana strategia procedury weryfikacyjnej została oparta na wykonanej *Analizie Rodzajów i Skutków Niezdatności* (FMEA)[1,2], przy użyciu oprogramowania wspomagającego FMEA-Pro6 (firmy DYADEM) [3]. Po oszacowaniu wartości atrybutów takich jak potencjalne zagrożenie skutkami niezdatności (Severity – „S”) potencjalne prawdopodobieństwo (częstość-occurrence) wystąpienia niezdatności „O”, potencjalna wykrywalność niezdatności (Detectability- „D”), wyznaczano iloczyny oszacowanych wartości atrybutów, określające liczbowe wskaźniki priorytetu działań korygujących. Wyznaczone miary priorytetu ryzyka – (RPN = SxOxD) wyznaczyły hierarchię wagi zagadnień niezawodnościowych, związanych z analizowanym systemem. W wyniku analizy wyłoniono te rodzaje niezdatności, które uznano za szczególnie istotne z punktu widzenia zapewnienia jakości działania rozpatrywanego systemu. Są to:

- Niezdatność połączeń elektrycznych pomiędzy zaciskami kontrolowanego obiektu, głowicą pomiarową i zaciskami układu pomiarowego;
- Niezdatność parametryczna, polegająca na nadmiernym i niekontrolowanym wzroście niepewności pomiarów ponad granice dopuszczalnej tolerancji;

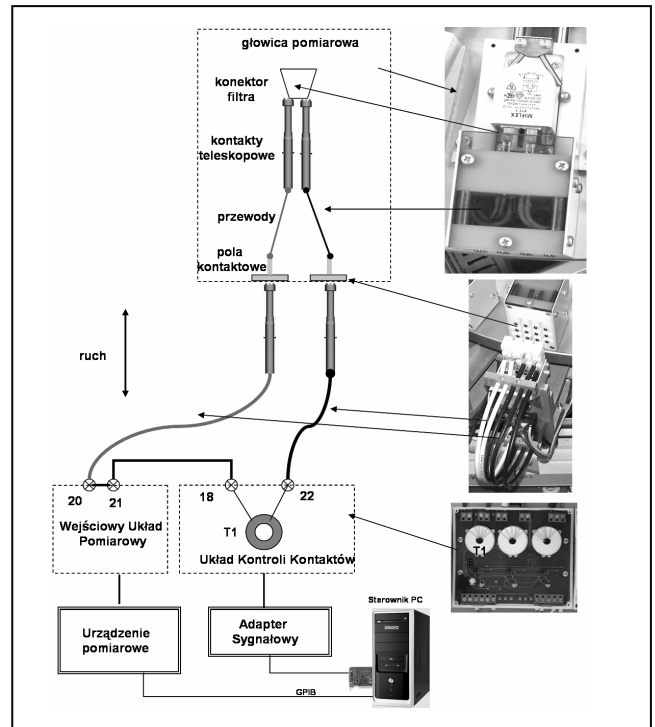
W oparciu o dokonaną analizę przyjęto więc taką strategię weryfikacji systemu, która integruje dwie techniki diagnostyczne: -współbieżną, permanentną diagnostykę stanów połączeń przemieszczanych głowic pomiarowych; -okresową diagnostykę, w postaci dwu rozłącznych procedur weryfikacyjnych, tzn. procedury weryfikacji funkcjonalnej zdolności systemu do automatycznego testowania obiektów (np. procedura cykliczna co jedną zmianę produkcyjną) oraz procedury weryfikacji niepewności pomiarowych stanowisk pomiarowych (np. z cyklem tygodniowym lub dłuższym). Poniżej przedstawiono opis zastosowanych metod i narzędzi.

3. Weryfikowanie połączeń przemieszczanych głowic pomiarowych systemu

Z analizy FMEA i przeprowadzonych badań [4] wynika, że najwyższy poziom ryzyka zawadności działania dotyczy podsystemu mechatronicznego, realizującego funkcje transportowania i łączenia badanych obiektów z wejściami stanowisk pomiarowych oraz segregacji końcowej połączonej ze znakowaniem obiektów. Stwierdzono, że największe zagrożenie (wartość RPN) wiąże się z zapewnieniem prawidłowych połączeń pomiędzy badanymi obiektami a podsystemem pomiarowym, co było inspiracją do szczegółowych badań z tego zakresu. Zagrożenie to wynika z możliwości fałszywego zakwalifikowania *Testowanego Produktu (TP)* o niewłaściwych parametrach bezpieczeństwa (np. oporności izolacji, wytrzymałości napięciowej, nadmiernej upływności). W przypadku testu takiego parametru, wykonanego w sytuacji braku galwanicznego połączenia *TP* z układem pomiarowym, wynik testu będzie pozytywny niezależnie od rzeczywistych wartości kontrolowanych parametrów. Dla zmniejszenia prawdopodobieństwo niezdatności opisywanych połączeń, opracowano takie zagadnienia jak - sposób rozwiązania konstrukcji uchwytu badanego podzespołu, dobór materiału na styki pomiarowe narażone na wielokrotne użycie, metoda zaprojektowania niezawodnego układu do kontroli poprawności połączeń pomiarowych.

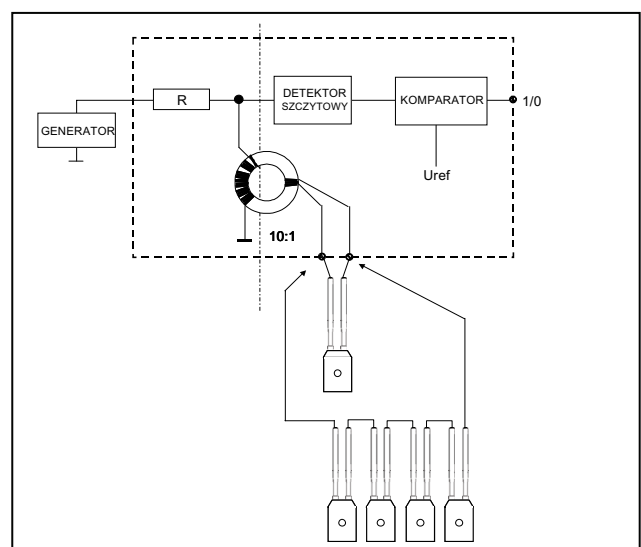
Opracowana technologia połączeń wykorzystuje podwójną warstwę kontaktów, w tym sprężynowe kontakty teleskopowe typu *SCP* [4] posiadające największą trwałość spośród oferowanych obecnie elementów kontaktujących. Z uwagi na wysoki poziom zagrożenia niezdatnością połączeń przyjęto

zasadę współbieżnego, permanentnego diagnozowania poprawności połączeń bezpośrednio przed każdym pomiarem określonego parametru *TP*. Na rysunku 2 przedstawiono sposób realizacji połączeń pomiędzy *TP*, głowicą pomiarową (przemieszaną karuzelowo wraz z *TP*), układem pomiarowym i układem monitorowania kontaktów w czasie trwania testu weryfikującego kontakty. Rysunek 3 przedstawia podstawową koncepcję rozwiązania układu weryfikowania stanu połączeń. Działanie układu sprawdzania połączeń, izolowanego galwanicznie od wejść i wyjść układów pomiarowych, inicjowane jest w momencie zamknięcia szczęk uchwytu z *TP*.



Rys.2 Ilustracja połączeń pomiędzy Testowanym Obiektem, głowicą pomiarową, układem pomiarowym i układem weryfikującym, w czasie testu weryfikacyjnego.

Fig. 2 The illustration of the connections between a Tested Object, a measurement head, a measurement instrument, and the verification circuit, during verification test;



Rys.3 Schemat ilustrujący sposób realizacji układu do weryfikacji połączeń przemieszczalnej głowic pomiarowej

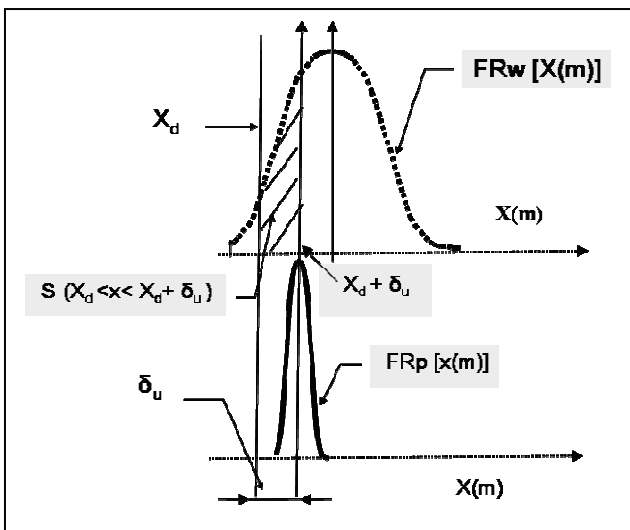
Fig. 3 The diagram, presenting the realization of the circuit for verification of connections of moving measurement head

Moduł detektora kontaktów zawiera jednocukładowy mikroprocesor klasy PIC, który generuje sygnał prostokątny o częstotliwości od 10 kHz do 30 kHz, który jest przesyłany do pierwotnego uzwojenia transformatora, obciążonego pojemnością.

Tworzy się w ten sposób obwód rezonansowy, przy czym częstotliwość jest dobierana automatycznie przez mikroprocesor podczas procedury kalibracji, tak aby zapewnić dostrojenie do rezonansu transformatora. Napięcie na uzwojeniu transformatora jest mierzone przez detektor szczytowy. W momencie zwarcia uzwojenia wtórnego napięcie na uzwojeniu pierwotnym zmniejsza swoją wartość. Jeśli wartość tego napięcia jest mniejsza niż ustalona w czasie kalibracji wartość progowa mikroprocesor ustawia bit wyjściowy w status „kontakt prawidłowy”.

4. Okresowa procedura weryfikacyjna

Specyficzną cechą opisywanej procedury weryfikacyjnej jest konieczność uwzględnienia krótkich czasów wykonywania poszczególnych elementarnych pomiarów kontrolnych (wynikających z wymaganej dużej wydajności procesu kontroli) oraz potrzeba kontroli wszystkich występujących zautomatyzowanych operacji pomocniczych, związanych z dołączaniem kontrolowanych obiektów za pośrednictwem głowic pomiarowych do wejść przyrządów pomiarowych, oraz z ich odłączaniem, transportowaniem i segregacją. Z drugiej strony, weryfikacja metrologiczna powinna zapewnić prawidłowe klasyfikowanie testowanych obiektów, a w szczególności zapewnienie, by zbiór TP zakwalifikowanych jako zgodne, nie zawierał (z prawdopodobieństwem bliskim 1) TP wadliwych w zakresie parametrów związanych z bezpieczeństwem.



Rys.4 Ilustracja relacji pomiędzy rozkładami gęstości prawdopodobieństwa: - kontrolowanej wielkości X_w , i możliwych wyników pomiaru pojedynczej wartości x_m

Fig.4 The diagram of relation between probability density distributions of: - a tested parameter X_w , and a measurement results of a single value x_m

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy ilustrujące wzajemne relacje pomiędzy dwoma rozkładami gęstości prawdopodobieństwa:

- a) funkcji rozkładu $FRw[X(m)]$ charakteryzującej partię kontrolowanych wyrobów dla wybranej, mierzonej wielkości $X(m)$, przy założeniu, że wyroby dobre powinny spełniać warunek $x(m) > X_d$;
- b) .funkcji rozkładu $FRp[x(m)]$ wyniku pomiaru wielkości $X(m)$ przyjmującej określoną wartość $x(m)=x_d + \delta_u$.

Z wzajemnych relacji rozkładów, zilustrowanych rys.4, wynika że spełnienie wymagań w zakresie wiarygodności klasyfikowania kontrolowanych wyrobów wymaga przesuwania granic klasyfikacji o wartość δ_u . Przyjęto, że wartość tego przesunięcia

δ_u jest równa modułowi gwarantowanej rozszerzonej niepewności pomiarowej u_g , zdefiniowanej tak, by prawdopodobieństwo pozytywnej oceny wyniku pomiaru parametru o wartości $x(m)$, niezgodnej z kryterium (a), było bliskie zeru (z przyjętym poziomem ufności):

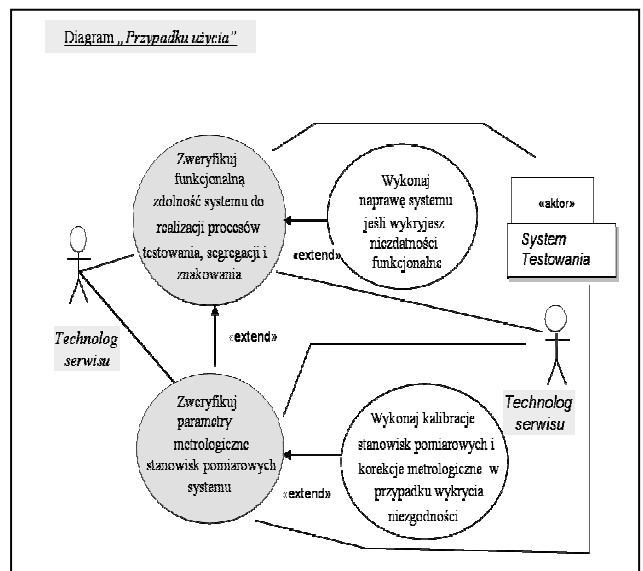
$$\delta_u = u_{gm} = \sqrt{u_{Agm}^2 + u_{Bgm}^2} = \sqrt{(4 * s_m)^2 + u_{Bgm}^2} \quad (1)$$

Parametr u_{Bgm} jest składnikiem gwarantowanej niepewności, wynikającym z nie w pełni skompensowanego pomiarowego błędu systematycznego, natomiast składnik u_{Agm} , ($u_{Agm} = 4 * s_m$), reprezentuje rozszerzoną losową składowa niepewności (o zwiększonym do 4 współczynnikiem rozszerzenia), przy czym s_m jest estymatą odchylenia standardowego dla funkcji rozkładu wyników pomiaru $FRp(x(m))$. Istnienie niepewności pomiaru o skończonej wartości i przyjęcie założenia, że prawdopodobieństwo fałszywej oceny produktów wadliwych powinno być bliskie zeru, implikują wystąpienie znaczącej wartości prawdopodobieństwa błędu fałszywej oceny produktów dobrych. Błąd ten skutkuje odrzucaniem pewnej liczby wyrobów dobrych jako nie spełniających kryterium zgodności (w opisywanym przykładzie nie spełniających warunku: $x(m) > X_d$).

Wartość prawdopodobieństwa popełnienia tego błędu, $p_f(m)$, jest w tym przypadku proporcjonalna do pola powierzchni pod funkcją $FRw(Xm)$, w zakresie $X_d < x(m) < X_d + \delta_u$:

$$p_f(m) = k_m * \int_{X_d}^{X_d + \delta_u} FRw(Xm) dx_m \quad (2)$$

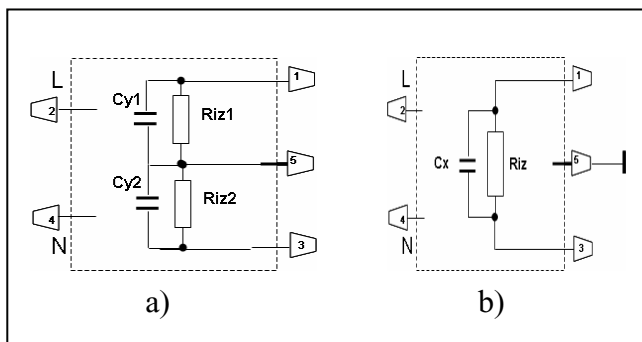
Jak wynika z wyrażenia (2), przy niezależnym od systemu pomiarowego przebiegu funkcji rozkładu parametrów kontrolowanego wyrobu $FRw(X_m)$, oraz ustalonej granicy tolerancji X_d , prawdopodobieństwo fałszywej oceny wyrobów dobrych $p_f(m)$ zależy znacząco od szerokości zakresu całkowania, tzn. od wartości przesunięcia granicy tolerancji równej δ_u , a tym samym od wartości gwarantowanej niepewności pomiarowej u_{gm} . W związku z powyższym, o ile sposób budowy systemu powinien zapewnić jak najmniejsze wartości gwarantowanych niepewności pomiarowych u_{gm} , to istotnym zadaniem procedury weryfikacyjnej jest sprawdzanie, czy rzeczywiste wartości niepewności pomiarowych, dla N mierzonych przez system parametrów, są poniżej wartości u_{gm} , dla $m = 1 \dots N$ [5].



Rys.5 Diagram UML „Przypadku użycia” procedury weryfikacyjnej
Fig. 5 The UML “Use Case” diagram of the verification procedure

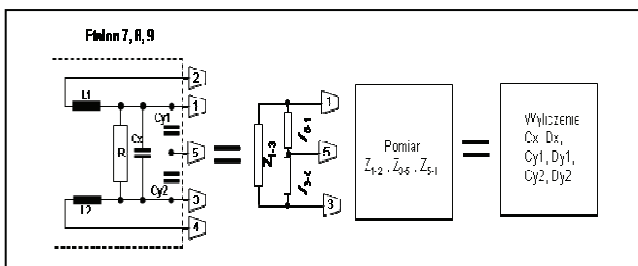
Dla opracowania i implementacji modułu programowego realizującego procedurę weryfikacji systemu, spełniającej przedstawione założenia, zastosowano Zunifikowany Język Modelowania (UML)[6], z wykorzystaniem systemu Enterprise

Architekt [7]. Rysunek 5 przedstawia diagram „przypadku użycia” w UML, dla modułu oprogramowania obiektowego „Weryfikator systemu”. Diagram ten definiuje strukturę programowego modułu weryfikacyjnego, z podziałem na dwa rozłączne działania – weryfikację funkcjonalną i weryfikację metrologiczną. Dla obu procedur opracowano wzorce testowe w postaci etalonów, modelujących mierzone wielkości charakteryzujące *TP* i posiadające identyczne z *TP* właściwości mechaniczne (w tym obudowy i styki kontaktujące). Poniżej przedstawiono przykłady etalonów zaprojektowanych dla przypadku systemu do testowania filtrów RLC. Do weryfikacji niepewności pomiarów rezystancji izolacji wykonano dwa etalony (dla klasy Y i X). Schematy elektryczne tych dwu etalonów pokazano na rys.6 a i b. Dla weryfikacji pomiarów pojemności, indukcyjności i $tg\delta$ wykonano trzy etalony, o różnych wartościach pojemności oraz indukcyjności, odpowiadających różnym zakresom pomiarowym. Ich schemat elektryczny pokazano na rysunku 7 wraz z układem zastępczym, służącym do algorytmicznego wyznaczania impedancji komponentów (wyliczanych na podstawie uzyskanych wyników pomiarów dokonywanych na dostępnych zaciskach zewnętrznych etalonów).



Rys.6 Schematy elektryczne etalonów do pomiaru rezystancji izolacji kl. Y - a) oraz kl. X - b)

Fig. 6 The diagrams of etalons, designed for insulation resistivity measurements, class Y - a), class X - b).



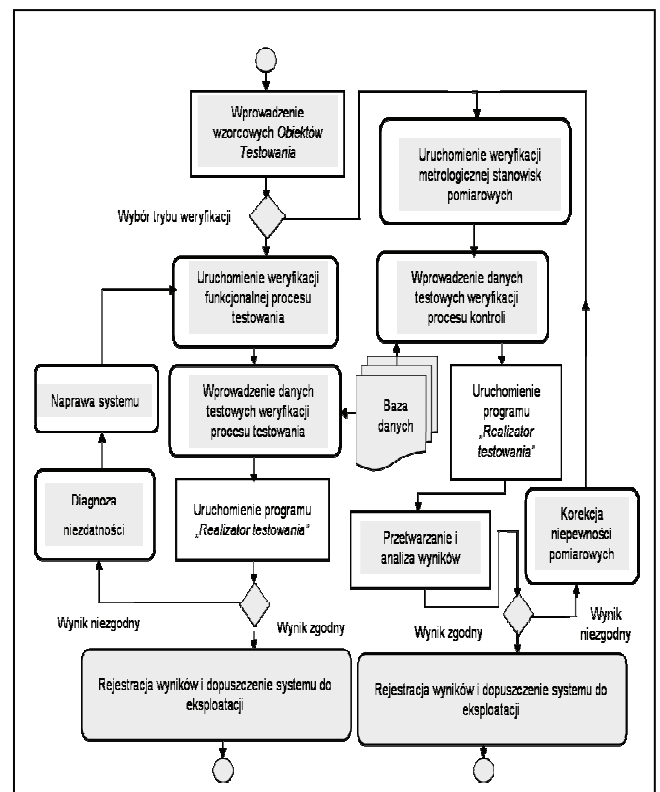
Rys.7 Schemat elektryczny etalonu do pomiaru indukcyjności L, pojemności C i współczynnika $tg\delta$ ($D = tg\delta$)

Fig. 7 The diagram of etalon, designed for measurements of inductance, capacitance and $tg\delta$ coefficient ($D = tg\delta$)

Na rysunku 8 przedstawiono „diagram aktywności” w języku modelowania UML, ilustrujący przebieg algorytmu realizacji tej procedury. Istotne jest, jak pokazano na rys.8, zastosowanie w procedurze weryfikacyjnej tych samych obiektów oprogramowania systemu pomiarowego, jakie są stosowane w normalnych procesach testowania produktów *TP*, jak również tych samych czynności mechatronicznych systemu. Dzięki takiemu podejściu weryfikowane są całościowo zdolności funkcjonalne systemu, włącznie z działaniem podsystemu mechatronicznego oraz działaniem oprogramowania odpowiedzialnego za klasyfikację i analizę wyników kontroli. Rzeczywiste parametry metrologiczne systemu są określane przez ich porównywanie z odpowiednimi wartościami wzorcowymi, (charakteryzującymi etalony) i stanowiącymi testowe dane odniesienia procedury weryfikacyjnej.

5. Podsumowanie

Efektywność opisanej procedury weryfikacyjnej potwierdzono praktycznie w ramach procesu budowania w Przemysłowym Instytucie Elektroniki automatycznego systemu do testowania filtrów RLC, przeznaczonego dla Zakładu MIXLEX. Procedura, zaimplementowana w formie programu komputerowego oraz układy służące weryfikacji tego systemu stanowią dogodne narzędzia do detekcji wad systemu zarówno w fazie badania prototypu jak i w trakcie produkcyjnej eksploatacji systemu. Przewiduje się, że w najbliższym czasie opracowana procedura i metodologia znajdują nowe zastosowania w następujących, projektowanych obecnie w PIE, automatycznych testerach elektrycznych podzespołów biernych.



Rys.8 Diagram UML „Aktywności” procedury weryfikacyjnej
Fig. 8 The UML “Activity” diagram of the verification procedure

6. Literatura

- [1] Techniki analizy niezawodności systemów. Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń, Polska Norma PN-IEC 812, grudzień 1994;
- [2] Stamatis D.H: Failure Mode and Effect Analysis, Quality Press, 1995
- [3] Guidelines for Failure Mode and Effect Analysis for Automotive, Aerospace and General Manufacturing Industries, DYADEM, 2003
- [4] Kern J., Machalica P.: „Wybrane metody i środki zwiększania niezawodności projektowanych przemysłowych systemów pomiarowych”, Szkoła-Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo”, Waplewo2005
- [5] Kern J.: *Wspomagane komputerowo procedury kalibracji i kontroli metrologicznej systemu pomiarowego z wbudowanym układem autodiagnostycznym*, Metrologia i Systemy Pomiarowe, Tom IV, Zeszyt 1-2, ss.31-42; PAN, Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997;
- [6] *Unified Modeling Language: Testing profile*, version 2.0 – Final adopted Specification ptc/2004-04-02, witryna OMG: www.omg.org/;
- [7] Enterprise Architect - UML Design Tools, <http://www.sparxsystems.com/products/ea.html>