

**Paweł STUDZIŃSKI, Piotr MACHALICA, Krzysztof BIERNACKI,
Bogdan MŁYNARSKI**
Instytut Tele-i Radiotechniczny, Warszawa

WYBRANE ASPEKTY PROJEKTOWANIA SYSTEMU DO KONTROLI I SEGREGACJI KONDENSATORÓW PRZECIWZAKŁÓCENIOWYCH

Słowa kluczowe:

Transmisja szeregową, GPIB, mostek RLC, kontakty teleskopowe, układ kontroli kontaktów, mechatronika, silnik krokowy, sterownik PLC.

Streszczenie

W artykule przedstawiono strukturę systemu do sprawdzania kondensatorów przeciwzakłóceniovych oraz schemat stanowiska pomiarowego. Z racji złożoności tego systemu, w ramach prac projektowych wykonano analizę rodzajów i skutków niezdatności (FMEA). W wyniku analizy wyselekcjonowano te rodzaje niezdatności, które są szczególnie istotne dla zapewnienia jakości działania systemu (niezdatność kontaktów elektrycznych oraz niezdatność parametryczna, polegająca na nadmiernym i niekontrolowanym wzroście niepewności pomiarów ponad granice dopuszczalnej tolerancji). Wyniki analizy FMEA poddano weryfikacji praktycznej przez opracowanie i zbadanie modeli głównych modułów systemu (pomiarowych i mechatronicznych), które decydują o precyzji pomiarów i wydajności testowania. Pozytywnie zweryfikowano procedury pomiarów głównych parametrów kondensatorów, przewidzianych do realizacji w ramach systemu do testowania. Zweryfikowano także układ detekcji impulsów prądu oraz układ kontroli kontaktów pomiarowych.

W ramach badań doświadczalnych sprawdzano modele układów ładowania i rozładowania, bardzo zbliżone do przewidywanych rozwiązań docelowych.

Wyniki doświadczalne pozwalają na optymalny dobór elementów, rzutujących na jakość badań i bezpieczeństwo obsługi systemu, tj.: przekaźniki wysokonapięciowe, rezystory mocy, kontakty teleskopowe. Na podstawie zebranych doświadczeń opracowano projekt oraz zbudowano model systemu do kontroli kondensatorów przeciwzakłóceniovych, który zostanie wdrożony w firmie *Miflex S.A.* w Kutnie.

Wprowadzenie

Kondensatory przeciwzakłóceniovie są stosowane powszechnie w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych. W ramach procesu produkcyjnego wszystkie wytworzone egzemplarze kondensatorów podlegają testowaniu. Operacje pomiarowo-kontrolne powinny obejmować szereg parametrów kondensatorów, tj.: pojemność i tg δ , wytrzymałość napięciową oraz rezystancję izolacji kondensatora. Założone dokładności pomiaru pojemności i tg δ są wysokie. Wysokie wymagania jakościowe, dotyczące produkcji kondensatorów, narzucają bardzo ostre ograniczenia co do liczby wadliwych egzemplarzy (na poziomie 1 ppm, a dla parametrów mających wpływ na bezpieczeństwo – nawet 0 ppm).

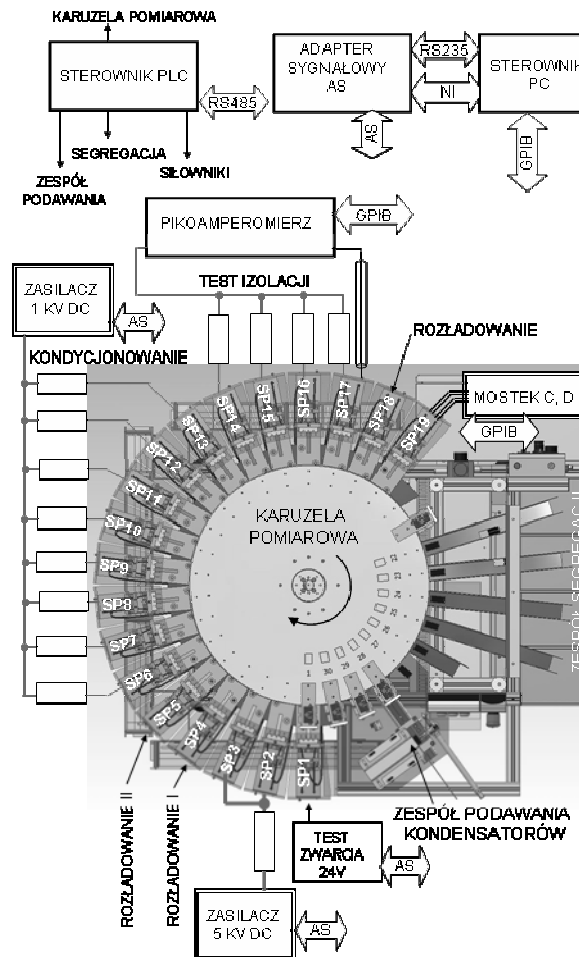
Ze względów ekonomicznych sprawdzenie pojedynczego kondensatora sieciowego powinno być wykonane w stosunkowo krótkim czasie. Aby uzyskać dużą wydajność testera założono, że sprawdzanie kondensatorów będzie wykonywane w sposób potokowy, na szeregu stanowiskach pomiarowych, przy czym pojedyncze stanowisko pomiarowe umożliwi pomiary tylko jednego parametru sprawdzanego kondensatora. Przemieszczanie testowanych kondensatorów pomiędzy kolejnymi stanowiskami pomiarowymi, realizacja kontaktów chwilowych na każdym stanowisku pomiarowym, wymaga zastosowania odpowiednich układów napędu. Równolegle z pomiarami powinna być wykonana automatyczna segregacja pomierzonych kondensatorów. W efekcie, rozważany system testujący, oprócz systemu pomiarowego, powinien być wyposażony w system mechatroniczny.

Celem pracy było opracowanie zasad projektowania złożonych systemów pomiarowo-mechatronicznych o dużej wydajności i precyzji współbieżnych pomiarów, wykonywanych w warunkach przemysłowych. Przykładem takiego urządzenia jest system do kontroli kondensatorów przeciwzakłóceniovych (w artykule opisano główne problemy związane z jakością testowania oraz sposoby ich rozwiązania).

1. Struktura systemu testującego

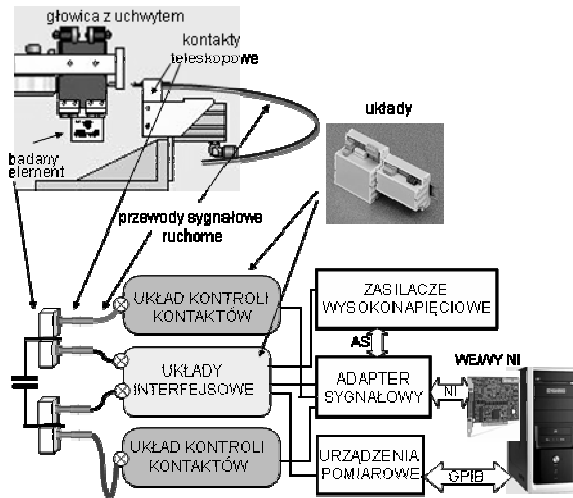
Aby uzyskać dużą wydajność testera założono, że sprawdzanie kondensatorów będzie wykonywane w sposób potokowy, przy wykorzystaniu tzw. zespołu karuzeli pomiarowej. Głowice pomiarowe z kondensatorami umieszczone są na obrotowej tarczy lub pierścieniu. W każdym cyklu pracy są one przemieszczane

na kolejne stanowiska pomiarowe, z którymi łączy się poprzez tzw. interfejs kontaktów chwilowych. Każde stanowisko pomiarowe umożliwia pomiary tylko jednego parametru sprawdzanego kondensatora. Równolegle z pomiarami następuje automatyczna segregacja pomierzonych kondensatorów. Widok ogólny systemu testującego do kontroli kondensatorów przedstawiono na rys. 1. W systemie można wyodrębnić trzy podsystemy: podsystem pomiarowy, podsystem mechatroniczny i podsystem informatyczny. Podsystem pomiarowy jest wyposażony w szereg stanowisk pomiarowych, przeznaczonych do pomiarów poszczególnych parametrów kondensatorów. W systemie pomiarowym uwzględniono także stanowiska, które służą do rozładowania kondensatorów po próbach napięciowych.



Rys. 1. Widok poglądowy systemu pomiarowo-informatycznego

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi: układy pomiarowe i urządzenia pomiarowe, właściwe dla mierzonego parametru oraz układy kontroli kontaktów (rys. 2). Urządzenia pomiarowe są sterowane ze sterownika komputerowego z wykorzystaniem magistrali GPIB oraz z kart akwizycji danych przez specjalny adapter sygnałowy, który dopasowuje sygnały cyfrowe TTL do poziomu 24 V (w obydwie strony) oraz konwertuje standard RS232 na standard RS485, wykorzystywany do sterowania mechaniką i pneumatyką.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Na szczególną uwagę zasługuje układ kontroli kontaktów pomiarowych [1]. Układ ten pozwala dokonać oceny rezystancji zwarcia kontaktów, które mogą się znajdować na bardzo wysokim potencjale względem masy testera. Wejście układu kontroli kontaktów musi być zatem separowane od reszty układu. W charakterze separatora zastosowano specjalny transformator.

Pojemność i tg δ poszczególnych kondensatorów są mierzone za pomocą mostka pomiarowego. Wymienione pomiary są wykonywane w układzie cztero-przewodowym, co pozwala zminimalizować wpływ elementów rozproszonych (R, L, C) na wynik pomiaru.

Z uwagi na złożoność rozważanego systemu testującego, w ramach prac projektowych, przeprowadzono analizę rodzajów i skutków niezdatności (FMEA), polegającą na analizie wymagań i struktur blokowo-funkcyjnych charakterystycznych dla grupy zautomatyzowanych systemów pomiarowo-kontrolnych, przeznaczonych do przemysłowej kontroli wyrobów elektronicznych i elektrycznych [2]. W wyniku tej analizy wyłoniono te rodzaje niezdatności, które uznano za szczególnie istotne z punktu widzenia zapewnienia jakości działania rozważanego systemu. Są to:

- niezdatność kontaktów elektrycznych:
 - pomiędzy zaciskami kontrolowanego obiektu a głowicą pomiarową,
 - pomiędzy głowicą pomiarową a stanowiskami pomiarowymi,
- niezdatność parametryczna, polegająca na nadmiernym i niekontrolowanym wzroście niepewności pomiarów ponad granice dopuszczalnej tolerancji.

Tester zawiera dużą liczbę elementów stykowych. Niezawodna praca elementów stykowych ma istotne znaczenie dla niezawodności działania całego testera [2]. Przeanalizowano dostępne rozwiązania konstrukcyjne w układach kontaktujących, które są stosowane we współczesnych zautomatyzowanych systemach pomiarowych. W testerze zastosowano kontakty teleskopowe (ang. *Spring Contact Probes-SPC*), które charakteryzują się najdłuższym czasem życia ($1E6$ cykli) [3].

Wprowadzono kontrolę poprawności kontaktów na każdym stanowisku pomiarowym, co pozwala na istotne zwiększenie niezawodności określenia wadliwych kondensatorów. Wymagana niezawodność powinna być lepsza od 1 ppm ($1E-6$).

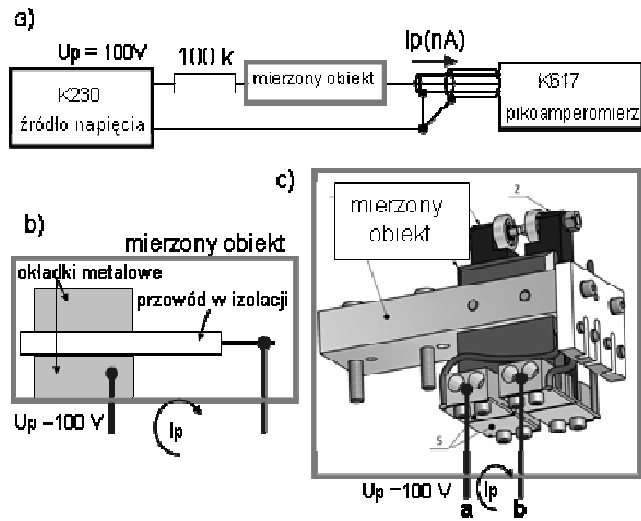
Analizowano warunki pracy elementów stykowych na poszczególnych stanowiskach pomiarowych [4]. Na stanowiskach pomiarowych, dotyczących ładowania (rozładowania) kondensatorów na elementach stykowych, mogą wystąpić napięcia do 5 kV, a chwilowe moce sygnałów przełączanych przekraczają 100 VA. Dostępne elementy przełączające są przystosowane do przełączania sygnałów o napięciach do kilkuset woltów. Praca z większymi napięciami grozi wypaleniem styków, co prowadzi do uszkodzenia tych elementów. W układach pomiarowych wprowadzono dodatkowe przekaźniki wysokonapięciowe, które umożliwiły ograniczenie wymagań co do parametrów kontaktów chwilowych [5].

2. Badania wybranych układów modelu systemu

Wyniki analizy FMEA poddano weryfikacji praktycznej poprzez wykonanie badań wybranych układów modelowych systemu. Do badania modeli opracowywano stanowiska badawcze oraz oprogramowanie wspomagające z wykorzystaniem platformy *LAB-View*.

Badanie głowicy pomiarowej

Model głowicy pomiarowej był badany pod kątem wytrzymałości mechanicznej szcęk uchwytu. W trakcie badań wykonano ok. miliona przełączeń. Wyniki próby uznano za pozytywne dla materiału o nazwie „nowe srebro”. Przeprowadzono pomiary różnych materiałów izolacyjnych pod kątem ich wykorzystania do konstrukcji głowicy. Badano także izolację kabli wysokonapięciowych, przewidywanych do zastosowania w głowicy. Układ do pomiaru rezystancji izolacji materiałów izolacyjnych, użytych do konstrukcji głowicy przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Pomiary materiałów izolacyjnych: a) układ pomiarowy, b) sposób pomiaru izolacji przewodów wysokonapięciowych, c) sposób pomiaru izolacji głowicy

Wyniki pomiaru przewodów wysokonapięciowych:

- *HK 18H Flexivolt HV*: 13 nA,
- *Lemo 1400470*: 100 pA,
- *LGsw 20 kV AMC SYSTEM*: 50 pA.

Do montażu przewodów pomiarowych w głowicy użyto przewodu *Lemo 1400470* (przewód 20 kV, ze względu na zbyt dużą średnicę zewnętrzną, nie może być zastosowany w głowicy). Przewód *LGsw 20 kV* został użyty do montażu połączeń w interfejsie kontaktów chwilowych.

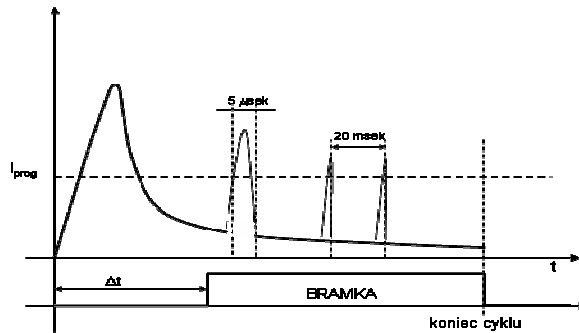
Wyniki pomiarów prądu upływu głowicy, pomiędzy zaciskami uchwytu (a i b) dla materiału *tarnamid* to: 13 nA i dla materiału *tarnoform* to: 50 pA.

Do konstrukcji elementów izolacyjnych został użyty *tarnoform* (poliacetal). Jego najważniejsze parametry to: chłonność wilgoci 0,25%, współczynnik strat dielektrycznych 0,003, rezystancja właściwa powierzchniowa $1E13 \Omega$ oraz wytrzymałość dielektryczna >50 kV/mm.

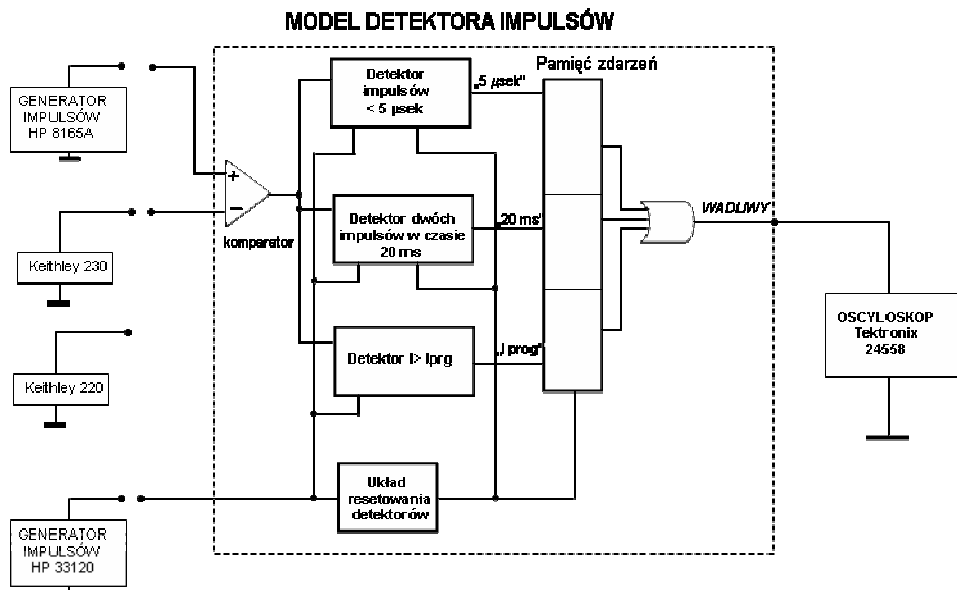
Badanie detektora impulsów

W czasie narażania kondensatora wysokim napięciem może lokalnie w zwijce kondensatora dochodzić do mikrowyładowań. Jeśli w jakimś miejscu folia dielektryka jest cieńsza lub gorszej jakości, może w tym miejscu nastąpić przebicie. Powstaje tzw. mikrołuk, w którym temperatura sięga $6000^{\circ}C$. Następuje odparowanie dielektryka i warstwy metalu. W miejscu mikrołuku powstaje przerwa. Kondensator jest nadal sprawny, jeśli te mikrowyładowania są krótkotrwałe. Jeśli impulsy są dłuższe niż $5 \mu s$ lub występują częściej niż co 20 ms,

kondensator zostaje uznany za wadliwy. Na rys. 4 przedstawiono przebieg prądu ładowania kondensatora oraz impulsy szkodliwe, które dyskwalifikują badany element. Model detektora impulsów oraz stanowisko do jego badania przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Przebieg prądu ładowania kondensatora z impulsami szkodliwymi



Rys. 5. Układ do badania modelu detektora impulsów

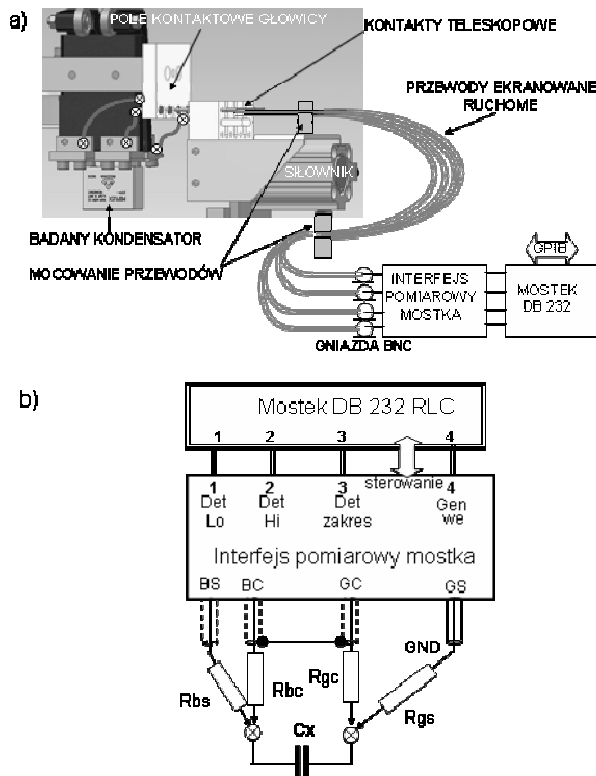
W układzie badano: dokładność monitorowania wartości progowej prądu I_{prog} , dokładność wykrywania impulsów $>5 \mu s$ oraz występowania dwóch impulsów w czasie $<20 ms$. Z analizy wyników badania, dla różnych założonych parametrów impulsów wejściowych, można stwierdzić, że idea zaproponowanego

rozwiązania układowego spełnia założone parametry techniczne dla kryteriów, określonych w założeniach badawczych:

- wykrywanie wartości I_{prog} – dokładność $\pm 10\%$ wartości $\pm 0,1$ mA,
- wykrywanie impulsu $> 5 \mu s$ – dokładność $\pm 0,5 \mu s$; $\pm 10\%$ wartości prądu,
- wykrywanie dwóch impulsów występujących w czasie 20 ms – dokładność ± 2 ms; $\pm 10\%$ wartości prądu (detekowane impulsy $> 2 \mu s$).

Badania wpływu rzeczywistych warunków pomiarowych mostka RLC na dokładności pomiaru

Pomiary parametrów kondensatorów są wykonywane w warunkach przemysłowych, które znacząco odbiegają od warunków laboratoryjnych (rys. 6). W rzeczywistych warunkach pomiarowych, obiekt mierzony łączy się z przewodami ekranowanymi mostka za pośrednictwem stosunkowo krótkich przewodów wysokonapięciowych. Przewody te nie są ekranowane. Dodatkowo należy się liczyć z wpływem rezystancji szeregowych przewodów pomiarowych oraz kontaktów. Wykonano badania wpływu tych rezystancji (tab. 1).



Rys. 6. Stanowisko pomiaru pojemności i stratności D: a) układ rzeczywisty, b) układ zastępczy

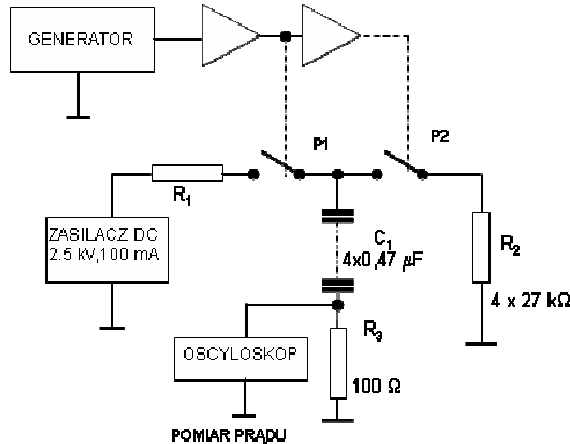
Tabela 1. Wpływ rezystancji szeregowych na pomiar C i D

rezystory szeregowe	fp=1 kHz		fp=10 kHz	
	Cx(nF)	Dx	Cx(nF)	Dx
Rbs=Rac=Rbc=Rgs=0	215,8	0,0002	215,7	0,0004
Rbs=Rac=Rbc=Rgs=100 W	215,8	0,0001	215,7	0,0001
Rbs=Rac=Rbc=Rgs=200 W	215,8	0,0002	215,1	0,0005

Podsumowując wyniki pomiarów można stwierdzić brak wpływu rezystancji szeregowych (do 100 Ω) na dokładność pomiaru pojemności C oraz niewielki wpływ na pomiary stratności D. Aby zagwarantować niewielkie wartości rezystancji szeregowych, w rzeczywistym układzie pomiarowym, zastosowano odpowiednie końcówki kontaktów teleskopowych oraz wprowadzono okresowe czyszczenie pól kontaktowych głowicy.

Badania przekaźników wysokonapięciowych

Przekaźniki wysokonapięciowe typu 5503 firmy *Coto* poddano testowi przyspieszonego starzenia. Schemat układu testowego przedstawiono na rys. 7. Badaniom poddano dwa przekaźniki P1 i P2. Przekaźnik P1 pracuje w warunkach, jakie występują podczas próby napięciowej, a przekaźnik P2 w warunkach próby rozładowania badanego kondensatora.



Rys. 7. Układ do badań przekaźników

Stałe czasu ładowania i rozładowania kondensatorów C1-C4 są równe, a ich wartość (20 ms) jest znacznie mniejsza w porównaniu z okresem sygnału generatora (400 ms). Dzięki temu zespół kondensatorów jest cyklicznie ładowany do napięcia o wartości równej sygnałowi wyjściowemu zasilacza, a następnie w pełni rozładowany. Założono, że sygnał wyjściowy zasilacza jest równy 2500 V, a wydajność prądowa zasilacza wynosi 100 mA. Maksymalny prąd

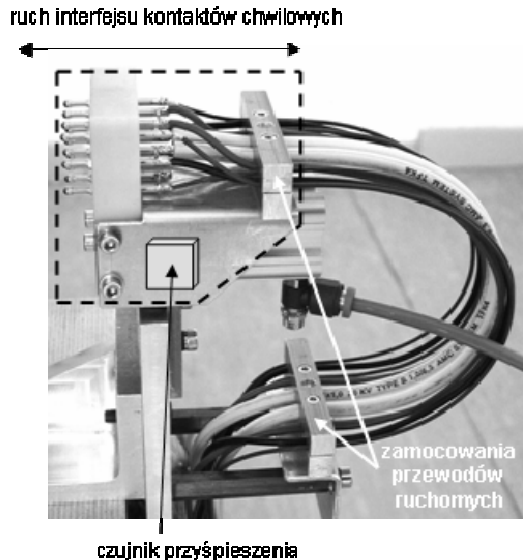
obciążenia zasilacza wynosi 23 mA, a moc sygnałów przełączanych 58 W. Wymienione warunki pracy przekaźników odpowiadają warunkom pracy przekaźników, które pracują w teście narażania kondensatora wysokim napięciem.

Przekaźniki były poddawane procesowi starzenia w cyklu 7,5 godzin pracy na dobę. Przy częstotliwości generatora sterującego 2,5 Hz, każdy z przekaźników był przełączany około 67 500 razy w ciągu doby. Pomiar rezystancji zwarcia przekaźników były wykonywane bez wymontowywania przekaźników z układu testującego.

Z przeprowadzonych pomiarów przekaźników typu 5503 wynika, że wartości pomierzonych rezystancji są mniejsze od 0,1 Ω . Zmiany rezystancji każdego z przekaźników w funkcji liczby przełączeń nie przekraczają 0,05 Ω (0,03 Ω po 400 000 cyklach; 0,02 Ω po 1 mln cykli). Dla porównania, dopuszczalna rezystancja zwarcia przekaźników (wg katalogu) nie przekracza 0,2 Ω .

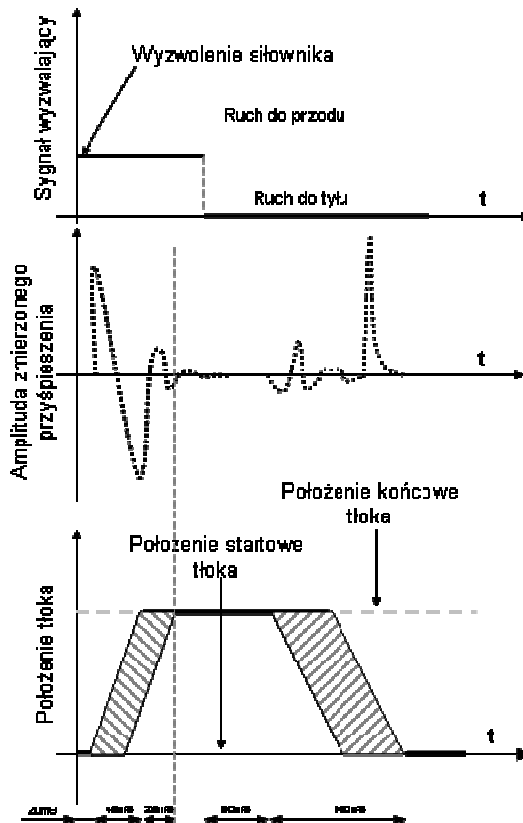
Badania siłowników

Na każdym stanowisku pomiarowym jest zainstalowany siłownik pneumatyczny, który umożliwia ruch interfejsu kontaktów chwilowych, w kierunku głowicy pomiarowej (rys. 8). Dzięki temu poszczególne kontakty teleskopowe z układu interfejsu kontaktów chwilowych dotykają do odpowiednich pól kontaktowych głowicy pomiarowej, co umożliwia realizację zadanych połączeń elektrycznych. Po wykonaniu pomiaru interfejs kontaktów chwilowych jest odsuwany od głowicy pomiarowej.



Rys. 8. Stanowisko do badania siłowników oraz do badania przewodów

Czasy przemieszczania się interfejsu kontaktów chwilowych wpływają na wypadkowy czas testowania pojedynczego kondensatora. Badano ruch tłoka siłownika w funkcji ciśnienia medium zasilającego siłownik. W wyniku szeregu prób wyznaczono zasilanie siłownika na poziomie 1600 hPa. Na rys. 9 przedstawiono wykresy przyspieszenia tłoka oraz drogę tłoka w funkcji czasu po zmianie sygnału, wyzwalającego siłownik.



Rys. 9. Wykresy przyspieszenia oraz drogi tłoka w funkcji czasu

Badania zmęczeniowe przewodów

Przewody, które łączą układ interfejsu kontaktów chwilowych z przyrządami pomiarowymi każdego ze stanowisk pomiarowych, podlegają także cyklicznym ruchom. Testowano różne sposoby połączeń przewodów, badania przeprowadzono dla kilku typów przewodów wysokonapięciowych, przewodów ekranowanych. Wybrano wysokonapięciowe przewody elastyczne w osłonie silikonowej. Sposób mocowania ruchomych przewodów pomiarowych przedstawiono na rys. 8.

Podsumowanie

System testujący, przeznaczony do kontroli kondensatorów przeciwzakłóceniovych, którego parametry przedstawiono w tab. 2, jest przykładem systemu o dużej wydajności i precyzji współbieżnych pomiarów, wykonywanych w warunkach przemysłowych.

Tabela 2. Parametry systemu do testowania kondensatorów przeciwzakłóceniovych

Parametr	Zakresy pomiarowe wartości parametrów	Dokładność pomiaru FS
Pojemność	0,4–4 μF 4 μF –40 μF	$\pm 0,5\%$ $\pm 1\%$
$\tan \delta$ (D)	0,0100 \pm 0,0010 0,0010 \pm 0,0002	$\pm 0,0005$ $\pm 0,0002$
Rezystancja izolacji	10 $\text{G}\Omega$ –100 $\text{G}\Omega$	$\pm 10\%$
Wytrzymałość napięciowa	100 V–5000 V	$\pm 5\%$
Napięcie polaryzacji	50 V–500 V	$\pm 5\%$
Wydajność	1800 szt/h	
Poziom emisji hałasu	< 80 dB	
Poziom emisji EMC	klasa A	
Zasilanie	230 V/16A	

System zostanie wdrożony u producenta filtrów i kondensatorów (*Miflex S.A.* w Kutnie). Model systemu został przebadany w akredytowanym laboratorium *LAB ITR*, z wynikiem pozytywnym, w zakresie bezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej (znak CE).

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego PN „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Machalica P., Baca K., Mocny W.: Układ detektora rezystancji zwarcia kontaktów chwilowych oraz sposób kalibracji układu detektora rezystancji zwarcia kontaktów chwilowych. Zgłoszenie patentowe P 383691.
2. Kern J., Machalica P.: Wybrane metody i środki zwiększania niezawodności projektowanych przemysłowych systemów pomiarowych. Szkoła-Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo, Waplewo 2005.
3. Machalica P. i in.: Wielostykowa głowica pomiarowa z układami kontroli kontaktów, Etap 2 – Projekt i wykonanie modelu głowicy oraz układów kontroli kontaktów. Sprawozdanie PIE, Warszawa 2004.

4. Studziński P., Machalica P.: Wybrane aspekty budowy modułów pomiarowych przeznaczonych do testowania filtrów przeciwzakłóceńowych RLC. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2006, 9bis.
5. Studziński P., Machalica P. Biernacki K.: Układ ładowania i rozładowywania kondensatorów filtrów przeciwzakłóceńowych, zwłaszcza do urządzeń testujących. Zgłoszenie patentowe P 385049.

Recenzent:

Marek GAWRYSIAK

The selected aspects of noise suppression capacitor testing system design

Key words

Serial transmission, GPIB, spring contacts, RLC Bridge, contact checking modules, mechatronics, stepper motor, PLC controllers.

Summary

This paper presents the concept of a measurement system for capacitor testing. The diagram of the measurement stand has been also shown. Because of the high system complexity during design phase, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was carried out. As the result of the FMEA analysis, the failures that are particularly important for the quality of system operation were selected (electrical contact failures and parametric failures, i.e. an excessive and uncontrolled rise in measurement uncertainty above the limits of acceptable tolerance).

The results of FMEA analysis were practically verified using the models (mechatronic and measurement models) of the main system modules that were designed and tested and which decide on the measurement accuracy and efficiency of testing. The measurement procedures for the main parameters of capacitors were also positively verified. The current pulse detection modules and measurement contact checking circuits were verified too. The main problems related to the quality of testing as well as their solutions have been presented. Many tester modules, e.g. measurement head, pulse detector, high voltage relays, and pneumatic cylinders, that have direct effect on the quality of tests and operator safety have been also checked. The Capacitor Testing System that has been designed and will be used in *Miflex S.A.* in Kutno has also been presented together with its characteristic parameters.

