

# Metody pomiaru elementów pasywnych z wykorzystaniem układów STA400 wyposażonych w magistralę testującą mieszaną sygnałowo IEEE 1149.4

Bogdan Bartosiński\*

## Wprowadzenie

Postępująca miniaturyzacja urządzeń oraz zwiększona gęstość montażu spowodowały problemy związane z testowaniem pakietów urządzeń elektronicznych. Konwencjonalne systemy testowania wewnątrzobwodowego i funkcjonalnego układów analogowych i cyfrowych, ze względu na ograniczony dostęp do węzłów badanego układu stają się coraz mniej użyteczne. Jedną z propozycji zwiększenia testowalności układów jest opracowany w 1999 roku standard magistrali testującej mieszanej sygnałowo IEEE 1149.4.

Podstawowym zadaniem standardu jest umożliwienie dostępu pomiarowego, poprzez magistralę analogową, do wyprowadzeń układów scalonych na pakiecie, co pozwala na uproszczenie lub wyeliminowanie z procesu testowania kosztownych głowic ostrzowych. Standard zapewnia następujące rodzaje testowania:

- testowanie połączeń – poszukiwanie zwarć i rozwarć wśród połączeń na pakiecie

- testowanie parametryczne – pomiar charakterystyk układów analogowych oraz testowanie obecności i wartości elementów dyskretnych
- testowanie wewnętrzne – testowanie rdzenia elementu mieszanej sygnałowo.

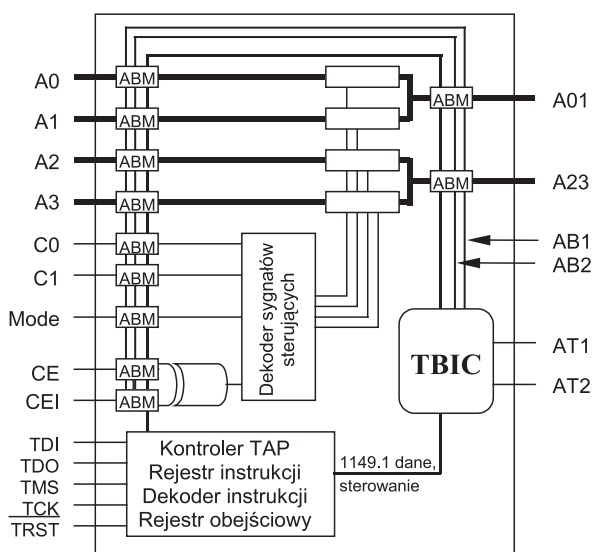
Magistrala mieszana sygnałowo IEEE 1149.4 [1] – w odróżnieniu od magistrali cyfrowej IEEE 1149.1, która jest zaimplementowana w wielu produkowanych seryjnie układach scalonych – jeszcze nie jest powszechnie stosowana.

Pierwszym układem scalonym wyposażonym w magistralę, który można wykorzystywać do zastosowań praktycznych, jest układ STA400 opracowany w firmie National Semiconductor we współpracy z firmą Logic-Vision. Układ ten został użyty do pomiarów elementów pasywnych z wykorzystaniem magistrali.

## Opis układu STA400

Układ STA400 (rys. 1) jest analogowym multiplekserem/demultiplekserem z wbudowaną magistralą IEEE1149.4. Rdzeń układu, czyli część realizująca jego funkcje użytkowe, składa się z czterech kluczy analogowych (linie A0-A23) oraz układu dekodera odpowiadającego za włączenie odpowiedniego klucza.

Pomiędzy każdym wyprowadzeniem funkcjonalnym układu a rdzeniem znajduje się analogowy moduł brzegowy ABM. Analogowe sygnały magistrali są doprowadzane liniami AT1 i AT2 i poprzez interfejs szyny testowej TBIC łączą się z wewnętrzną magistralą analogową AB1, AB2, która dochodzi do wszystkich modułów ABM. Dziewięć modułów ABM (bez modułów CE i CEI) może być stosowanych w charakterze wirtualnych sond pomiarowych, za pomocą których można na wyprowadzeniach funkcjonalnych obserwować poprzez magistralę analogowe sygnały lub wymuszać analogowe pobudzenia.



Rys. 1. Schemat blokowy układu STA400

\* Dr inż. Bogdan Bartosiński – Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Systemów Elektronicznych

## Pomiary rezystancji z wykorzystaniem magistrali

Ze względu na duże rezystancje kluczy magistrali zalecane przez normę IEEE 1149.4 metody diagnostyczne wymagają używania przede wszystkim wymuszeń prądowych. Źródło prądowe używane w pomiarach powinno mieć ograniczenie napięciowe, w celu zabezpieczenia układów STA400 przed przekroczeniem dopuszczalnych napięć.

Gdy mierzony rezystor jest dołączony jednym wyprowadzeniem do masy, pomiary wykonano w konfiguracji pokazanej na rys. 2. Pomiar odbywał się przez pobudzenie rezystora źródłem prądowym linią AT1 poprzez klucze S5 modułu TBIC i klucz SB1 modułu ABM. Napięcie mierzono multimetrem HP34401A za pośrednictwem linii AT2 magistrali i kluczy S6 i SB2. Rezystancję wyznaczano z zależności

$$R_x = U_{A0} / I_T. \quad (1)$$

Wyniki pomiarów dla prądu pobudzającego  $I_T = 100 \mu A$  przedstawia tabela 1, gdzie  $R_{x \text{ HP34401A}}$  jest wartością rezystancji zmierzoną bezpośrednio za pomocą multimetru HP34401A, natomiast  $R_{x \text{ IEEE 1149.4}}$  wartością wyznaczoną za pośrednictwem magistrali z zależności (1), natomiast

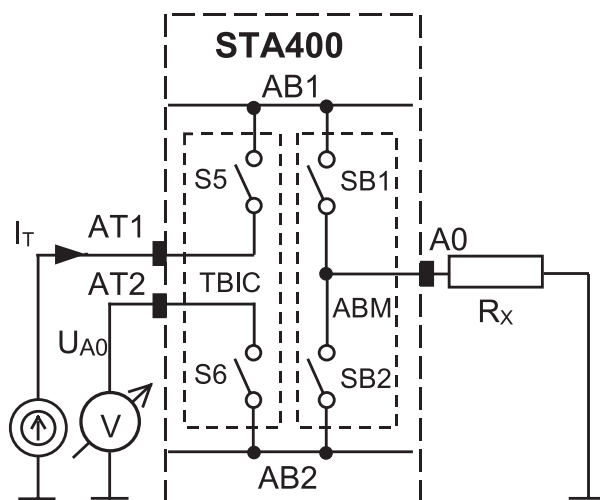
$$\delta = \frac{R_{x \text{ IEEE 1149.4}} - R_{x \text{ HP34401A}}}{R_{x \text{ HP34401A}}}.$$

Dla rezystora umieszczonego pomiędzy wyprowadzeniami dwóch układów scalonych połączenie jednej końcówki rezystora  $R_x$  z masą odbywa się przez klucz SG w module ABM. W pierwszym etapie (rys. 3a) pobudzenie prądowe  $I_T$  jest podawane linią AT1 magistrali, natomiast za pomocą linii AT2 jest mierzone napięcie  $U_{A0}$  na wyprowadzeniu A0 układu IC1. W etapie drugim (rys. 3b) pobudzenie pozostaje bez zmian, natomiast mierzone jest napięcie  $U_{A1}$  na wyprowadzeniu A1 układu IC2. Rezystancję  $R_x$  można wyznaczyć jako

$$R_x = (U_{A0} - U_{A1}) / I_T. \quad (2)$$

Przykładowe wyniki pomiarów dla prądu pobudzającego  $I_T = 100 \mu A$  przedstawione zostały w tabeli 2.

Wyznaczone w tej konfiguracji błędy są znacznie większe niż poprzednio, szczególnie dla rezystorów o małych wartościach. Analizując to zjawisko stwier-



Rys. 2. Pomiar rezystancji elementu dołączonego do masy

dono, że jego przyczyną są błędy pomiaru napięć poprzez magistralę w węzle A1, w którym jest włączony klucz SG modułu ABM. Błędy te, na poziomie pojedynczych miliwoltów, mają szczególnie negatywny wpływ na pomiar rezystorów o małych wartościach. Zaproponowano poprawę dokładności przez wykorzystanie dodatkowego wyprowadzenia (np. A2) do pomiaru napięcia w węzle A1. Rozwiązanie to pozwoliło na poprawę dokładności o jeden rząd.

Z powodu ograniczeń wprowadzanych przez metody z użyciem źródła prądowego, zaproponowano pomiar rezystancji ze źródłem napięcia  $U_H$  w modułach ABM. Źródło to używane jest do wymuszania stanu jedynek logicznej i jest stosowane do testowania połączeń.

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Mierzony rezystor  $R_x$  jest pobudzany ze źródła napięcia  $U_H$ , poprzez dodatkowy rezystor wzorcowy  $R_w$ . Za pośrednictwem linii AT2 magistrali mierzone są napięcia  $U_{A0}$  i  $U_{A1}$ , co pozwala określić prąd  $I_x$  płynący przez  $R_x$

$$I_x = \frac{U_{A1} - U_{A0}}{R_w}. \quad (3)$$

Znając prąd i napięcie na  $R_x$  możemy wyznaczyć jego wartość jako

$$R_x = \frac{U_{A0}}{I_x} = U_{A0} \frac{R_w}{U_{A1} - U_{A0}}. \quad (4)$$

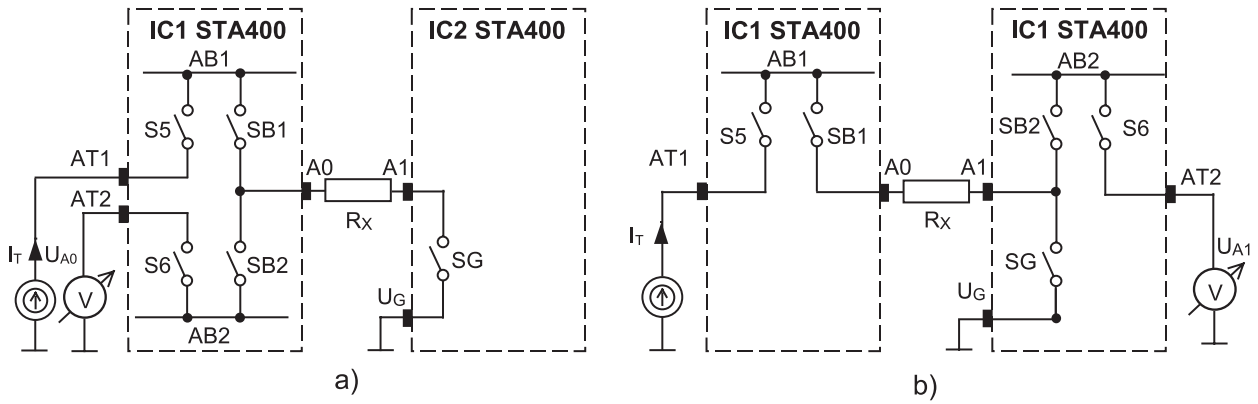
Wyniki weryfikacji opisanej metody przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 1. Pomiar rezystancji rezystora dołączonego jednym wyprowadzeniem do masy

$R_{x \text{ HP34401A}} (\Omega)$	10,205	100,253	1000,60	10003,2
$R_{x \text{ IEEE 1149.4}} (\Omega)$	10,11	100,57	1004,9	10041
$\delta (\%)$	-0,93	0,32	0,42	0,37

Tabela 2. Pomiar rezystancji rezystora między wyprowadzeniami układów scalonych

$R_{x \text{ HP34401A}} (\Omega)$	10,205	100,253	1000,60	10003,2
$R_{x \text{ IEEE 1149.4}} (\Omega)$	15,96	100,62	1008,2	10002
$\delta (\%)$	56	5,9	0,76	0,20



Rys. 3. Pomiar rezystancji elementu pomiędzy wyprowadzeniami układów scalonych

Jak widać (tab. 3), opisana metoda pozwala mierzyć rezystancję elementu  $R_x$  w zakresie od pojedynczych omów do dziesiątków kiloomów z błędem nieprzekraczającym 0,5 %. Metoda ta nie wymaga źródła prądowego, a jedynie dodatkowego rezystora wzorcowego. Rozszerzenie zakresu mierzonych rezystancji można zrealizować przez zmianę wartości rezystora  $R_w$ .

Opisane powyżej metody nadają się do pomiaru pojedynczych rezystorów. Do pomiaru kilkuelementowych struktur nadaje się metoda diagnostyczna oparta na twierdzeniu Tellegena [2]. Metoda ta, wraz z wynikami praktycznej weryfikacji dla struktur trzyelementowych i pięcioelementowych, została opisana w pracach [3, 4].

zystancję  $R$  połączonych szeregowo kluczy modułu TBIC i ABM. Częstotliwość graniczna jest wyznaczana poprzez zmianę częstotliwości generatora i monitorowanie napięcia na kondensatorze. Wartość pojemności wyznaczana jest z zależności:

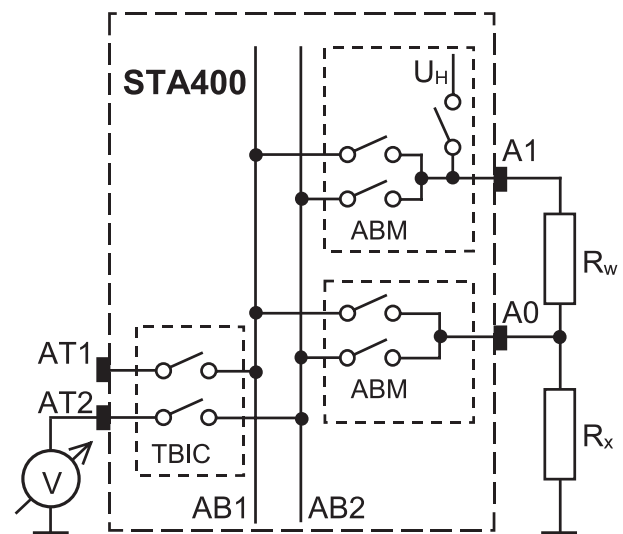
$$C_x = \frac{1}{2\pi f_{3dB} R} \quad (5)$$

Metoda ta została zweryfikowana praktycznie w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 5. Ze względu na unipolarne zasilanie układu STA400 sygnał z generatora miał składową stałą +400 mV i napięcie wyjściowe

## Pomiary pojemności z użyciem magistrali

Norma IEEE 1149.4 proponuje pomiar impedancji drogą pobudzenia prądowego i pomiaru napięcia. Pomiar te wymagają precyzyjnego źródła prądu zmiennego oraz woltomierza wektorowego pozwalającego zmierzyć amplitudę i fazę napięcia. Opisana metoda może być stosowana w warunkach laboratoryjnych, jednak w praktyce inżynierskiej bardziej przydatne są metody, w których używane są powszechnie dostępne przyrządy pomiarowe. Poniżej zostaną przedstawione dwie takie metody, w których do pomiaru pojemności używa się jedynie generatora o regulowanej częstotliwości oraz prostego woltomierza napięcia zmiennego, bez możliwości pomiaru fazy napięcia.

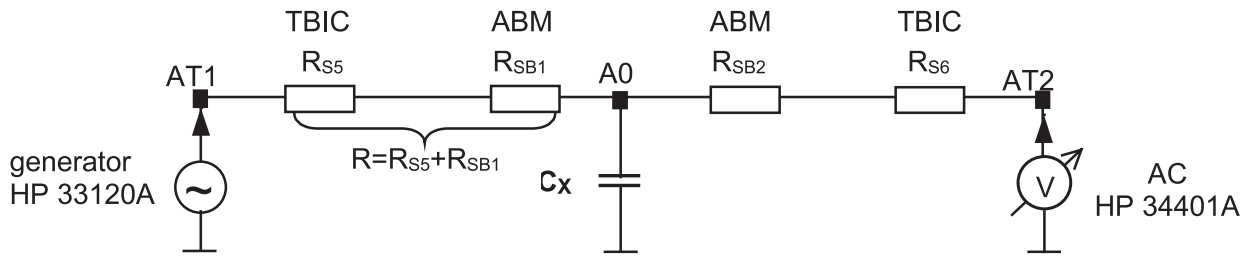
Pierwsza metoda [5] oparta jest na wyznaczeniu 3 dB częstotliwości granicznej filtra dolnoprzepustowego utworzonego przez mierzony kondensator i re-



Rys. 4. Pomiar rezystancji z wykorzystaniem źródła napięcia  $U_H$  w module ABM

Tabela 3. Pomiar rezystancji  $R_x$  z użyciem źródła  $U_H$

$R_{x \text{ HP34401A}} (\Omega)$	10,205	100,253	1000,60	10003,2	100030
$U_{A0} (\text{mV})$	27,235	257,70	1831,7	4288,3	4906,7
$U_{A1} (\text{mV})$	2685,2	2826,3	3661,5	4714,6	4956,5
$R_{x \text{ IEEE 1149.4}} (\Omega)$	10,244	100,30	1000,8	9986,9	98506
$\delta (\%)$	0,39	0,05	0,02	-0,16	-1,5



Rys. 5. Pomiar pojemności metodą wyznaczenia 3dB częstotliwości granicznej

100 mV<sub>sk</sub>. W tabeli 4 przedstawiono wyniki weryfikacji metody przy wyznaczeniu rezystancji R kluczy modułu TBIC i ABM przez bezpośredni pomiar multimetrem HP 34401A oraz przy wyznaczeniu tej rezystancji drogą kalibracji dla znanej pojemności C = 100 nF.

Duże błędy, przy użyciu do obliczeń rezystancji kluczy modułu TBIC i ABM zmierzonych bezpośrednio multimetrem, są spowodowane zmianami tej rezystancji pod wpływem zmian napięć na kluczach magistrali. Znaczną poprawę dokładności można uzyskać, kalibrując układ przez pomiar częstotliwości granicznej dla jednej znanej pojemności i z zależności (5), wyznaczając wartość R.

Lepszą dokładność pomiaru pojemności z wykorzystaniem magistrali zapewnia metoda oparta na użyciu źródła napięciowego AC [5] i pośrednim wyznaczeniu prądu, przez pomiar napięcia na dodatkowym szeregowo włączonym rezystorze wzorcowym R<sub>w</sub>.

Istota metody wraz z wykresem wskazowym napięcie jest przedstawiona na rys. 6, gdzie U<sub>g</sub> jest napięciem z generatora, a napięcia U<sub>2</sub> i U<sub>1</sub> odpowiednio napięciami na rezystorze i kondensatorze. Zakładając, że kondensator jest idealny i napięcie U<sub>1</sub> jest opóźnione o 90 stopni w stosunku do prądu, możemy wyznaczyć U<sub>2</sub> z poniższego wyrażenia

$$U_2 = \sqrt{(U_g^2 - U_1^2)} \quad (6)$$

Znając wartość U<sub>2</sub>, możemy obliczyć wartość pojemności

$$C_x = \frac{1}{2\pi f Z} \quad (7)$$

gdzie Z jest

$$Z = \frac{U_1}{I} = \frac{U_1 R_w}{U_2} \quad (8)$$

Metoda została zweryfikowana praktycznie w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 7. W układzie tym kondensator jest dołączony do wyprowadzenia A<sub>0</sub> układu scalonego, a rezystor wzorcowy R<sub>w</sub> pomiędzy wyprowadzenia A<sub>0</sub> i A<sub>1</sub>. Napięcie U<sub>2</sub> jest tu wektorową różnicą napięcia U<sub>A0</sub> mierzonego linią AT2 na wyprowadzeniu A<sub>0</sub> i napięcia U<sub>A1</sub> mierzonego następnie linią AT2 na wyprowadzeniu A<sub>1</sub>. Poszukiwana wartość pojemności może być wyznaczona z poniższego wyrażenia

$$C_x = \frac{\sqrt{(U_{A1}^2 - U_{A0}^2)}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_w U_{A0}} \quad (9)$$

Wyniki pomiarów pojemności z zakresu 10 nF - 10 μF dla rezystora wzorcowego R<sub>w</sub> = 1 kΩ i częstotliwości 1 kHz i 10 kHz zostały przedstawione w tabeli 5.

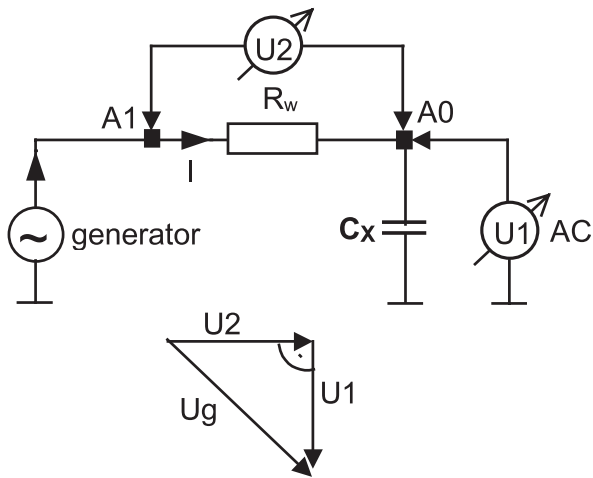
W porównaniu z poprzednią, metoda ta zapewnia większą dokładność. Ponieważ rezystor wzorcowy R<sub>w</sub> i mierzona pojemność C tworzą filtr dolnoprzepustowy istotny jest wybór odpowiedniej częstotliwości po-

Tabela 4. Pomiar pojemności metodą wyznaczania częstotliwości granicznej

C <sub>x</sub> dekada (nF)		10	100	1000	10000
f <sub>3dB</sub> (kHz)		17,136	1,7593	0,17592	0,017254
R = 1,0788 kΩ (HP 34401 A)	C <sub>x</sub> IEEEE1149,4 (nF)	8,609	83,86	838,6	8551
	δ (%)	-14	-16	-16	-15
R = 0,9046 kΩ (kalibracja)	C <sub>x</sub> IEEEE1149,4 (nF)	10,27	100,0	1000,1	10200
	δ (%)	2,7	0,00	0,01	2,0

Tabela 5. Pomiar pojemności z pośrednim wyznaczeniem prądu

f (Hz)	R <sub>w</sub> (kΩ)	C <sub>x</sub> (nF)	10	100	1000	10000
1000	1000	C <sub>x</sub> IEEEE 1149,4 (Ω)	12,35	100,47	1005,3	10051
		δ (%)	24	0,47	0,53	0,51
10000	1000	C <sub>x</sub> IEEEE 1149,4 (Ω)	10,10	100,4	1000,5	30940
		δ (%)	0,97	0,40	0,05	209



Rys. 6. Zasada pomiaru pojemności z pośrednim wyznaczaniem prądu

miarowej. Dla częstotliwości znacznie mniejszych niż 3 dB częstotliwości granicznej napięcie na wyprowadzeniu A0 jest zbliżone do napięcia na wyprowadzeniu A1 ( $U_{A0} \approx U_{A1}$ ), natomiast dla częstotliwości znacznie większych od częstotliwości granicznej napięcie  $U_{A0}$  jest bliskie zera. Stąd, żeby zapewnić wystarczającą dokładność [5], częstotliwość pomiarowa powinna spełniać warunek  $0,2 f_{3dB} < f < 20 f_{3dB}$ .

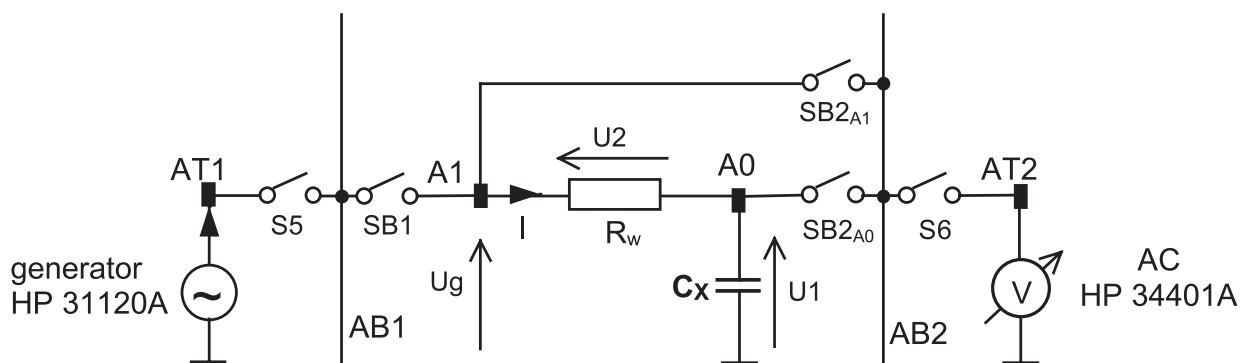
## Podsumowanie

Wykonane badania potwierdziły użyteczność układów STA400 wyposażonych w magistralę IEEE 1149.4 do pomiarów elementów pasywnych na pakietach układów elektronicznych. Układy te z powodzeniem mogą być zastosowane do pomiarów rezystorów z dokładnością lepszą niż 0,5 % oraz do pomiarów bezstratnych kondensatorów z dokładnością na poziomie od poniżej 1 % do pojedynczych procentów. Zaletą proponowanych metod jest ich prostota – do pomiaru rezystancji wystarczy źródło prądowe DC i woltomierz, natomiast do pomiaru pojemności generator o regulowanej częstotliwości i woltomierz AC oraz ewentualnie dodatkowy rezystor wzorcowy. Badania wykazały również wady układów STA400, a przede wszystkim dużą rezystancję kluczy magistrali analogowej oraz błędy pomiaru na-

pięć (na poziomie kilku miliwoltów) w module ABM, który jest dołączony kluczem SG do masy.

## Bibliografia

- [1] IEEE Std 1149.4-1999 Standard for a Mixed-Signal Test Bus; 28 March 2000, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York.
- [2] Bartosiński B., Toczek W.: *Some methods of diagnosis of analog circuit using mixed signal test bus IEEE 1149.4*. Metrology and Measurement Systems 2003 vol. 10, nr 2, s. 157-172.
- [3] Bartosiński B.: *Zastosowanie układów testowych STA 400 z magistralą testującą mieszaną sygnałowo IEEE 1149.4 do diagnostyki układów analogowych*. VI Szkoła-Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK' 2003. Waplewo, 26-29 maja 2003. Warszawa Instytut Podstaw Elektroniki, Wydział Elektroniki, WAT 2003 t. 2 Referaty, s. 209-214.
- [4] Zaranek W.: *Diagnostyka układów analogowych z wykorzystaniem magistrali IEEE 1149.4*. Praca dyplomowa, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2002.
- [5] Duzevik I.: *Preliminary results of passive component measurement methods using an IEEE 1194 compliant device*. International Test Conference, ITC 2002.



Rys. 7. Układ do pomiaru pojemności z pośrednim wyznaczaniem prądu