

Rezystancja wyjściowa kalibratorów napięć

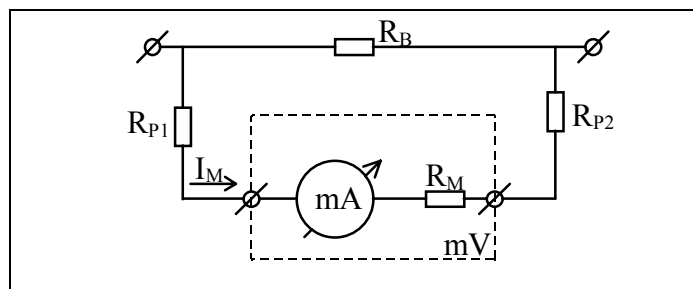
Duża rezystancja wyjściowa kalibratorów napięć może uniemożliwiać sprawdzanie mierników napięcia o dużym poborze prądu. Większość znanych kalibratorów uniwersalnych nawet najwyższych klas dokładności nie jest w stanie sprostać pozornie prostemu zadaniu pomiarowemu polegającemu na sprawdzeniu klasy dokładności miliwoltomierza magnetoelektrycznego 60mV/10mA klasy 1,5 przystosowanego do współpracy ze standardowym bocznikiem. Badanie mierników napięcia o dużym poborze prądu wymaga stosowania czteroprzewodowego podłączenia badanego miernika do zacisków kalibratora. Umożliwia to, podobnie jak przy czteroprzewodowym pomiarze rezystancji, redukcję wpływu rezystancji przewodów łączeniowych na wynik pomiaru. Czteroprzewodowe łączenie obciążenia z kalibratorem jest wymagane przy pracy kalibratora na niskich zakresach napięciowych - analogicznie jak czteroprzewodowy pomiar małych rezystancji. Analizując właściwości kalibratorów uniwersalnych zauważamy następującą sytuację:

- dla zakresów niskich napięć 10mV-100mV-1V kalibratory mają dużą rezystancję wyjściową i nie mają możliwości czteroprzewodowego podłączenia obciążenia,
- dla zakresów średnich i wysokich napięć 10V-100V-1000V producenci kalibratorów polecają możliwość czteroprzewodowego podłączania obciążenia, co użytkownikowi często nie jest już potrzebne.

Wymaganą jakość w tym zakresie stanowi najnowszy krajowy kalibrator uniwersalny napięć i prądów stałych i przemiennych typu C-101, który dla wszystkich zakresów napięciowych posiada możliwość czteroprzewodowego podłączenia obciążenia. Zbudowany z wykorzystaniem zamkniętej struktury śledzącej z astatyczną charakterystyką regulacji ma teoretycznie zerową rezystancją wyjściową.

Specyfika pomiaru prądu stałego

Pomiar prądu stałego w zakresach od 1A realizowany jest w pomiarach przemysłowych zazwyczaj w układzie wg rys.1 złożonym z zewnętrznego bocznika R_B , miliwoltomierza mV i przewodów łączących o rezystancji R_{P1} i R_{P2} . W kraju produkowany jest pełny typoszereg boczników na prądy od 1A do 15kA [1,2,3], przystosowanych do współpracy z miliamperomierzem magnetoelektrycznym mA o rezystancji wewnętrznej R_M , wykonywanych typowo na zakres 60mV lub 150mV. Trudniejszy do sprawdzania jest miliwoltomierz o zakresie 60mV o prądzie ustroju pomiarowego $I_M=10mA$, co odpowiada rezystancji wewnętrznej $R_M=6\Omega$. Sumaryczna rezystancja przewodów łączących miliwoltomierz z bocznikiem powinna wynosić $R_{P1}+R_{P2}=0,035\Omega$. Spełnienie tych wymagań umożliwia wymiennność mierników i boczników, co z kolei pozwala na oddzielne sprawdzanie miernika i bocznika, zarówno w procesie produkcji, jak i eksploatacji.



Rys.1. Schemat amperomierza prądu stałego

Wymagania na parametry kalibratora

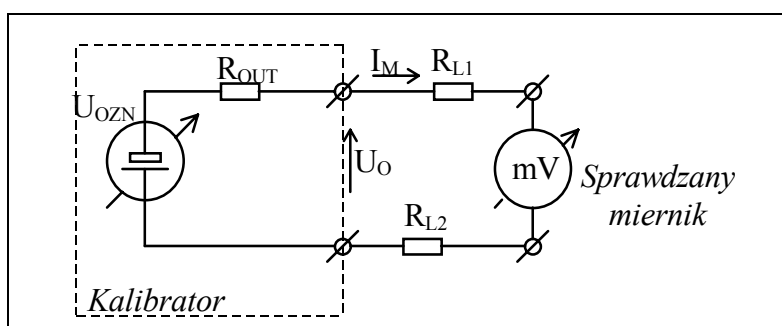
Do zacisków kalibratora przyłączany jest sprawdzany miernik za pomocą przewodów o rezystancji linii R_{L1} i R_{L2} spełniającej warunek $R_{L1}+R_{L2}=R_{P1}+R_{P2}=0,035\Omega$. Kalibrator jest nastawialnym źródłem napięcia U_{OZN} o rezystancji wewnętrznej równej R_{OUT} , co ilustruje rys.2. Na zaciskach wyjściowych kalibratora wytwarzane jest napięcie U_O dane wzorem

$$U_O = U_{OZN} - I_M \cdot R_{OUT} \quad (1)$$

gdzie I_M jest prądem sprawdzanego miernika. Dopuszczalny błąd napięcia wyjściowego kalibratora spowodowany spadkiem napięcia na rezystancji wewnętrznej R_{OUT} przy znamionowej wartości napięcia na mierniku powinien spełniać wymaganie

$$\Delta U_O = U_{OZN} - U_O \leq 20\% \cdot \frac{kl}{100} \cdot U_{ZN} \quad (2)$$

gdzie: kl - klasa dokładności sprawdzanego miernika, np. 1,5 ,
 U_{ZN} - napięcie znamionowe miernika równe np. 60mV.



Rys.2. Układ do sprawdzania miernika amperomierza

Z zależności (1) i (2) otrzymujemy wymaganie na rezystancję wyjściową kalibratora

$$R_{OUT} \leq \frac{0,002 \cdot kl \cdot U_{ZN}}{I_{MZN}} \quad (3)$$

gdzie I_{MZN} jest znamionowym prądem miernika, np. 10mA. Zatem dla powszechnie stosowanych mierników klasy 1,5 rezystancja wyjściowa kalibratora nie powinna przekraczać $0,018\Omega$, natomiast dopuszczalny błąd podstawowy ΔU_O źródła napięcia U_{OZN} dla miernika klasy 1,5 o napięciu $U_{ZN}=60\text{mV}$ wg (2) powinien spełniać wymaganie $\Delta U_O \leq 0,18\text{mV}$.

Analiza wpływu obciążenia wyjścia - struktura z dzielnikiem wyjściowym

Właściwości kalibratora napięć powinny możliwie zbliżyć się do idealnego źródła napięciowego. Stopień odstępstwa rzeczywistego kalibratora od właściwości idealnych źródeł opisywany jest:

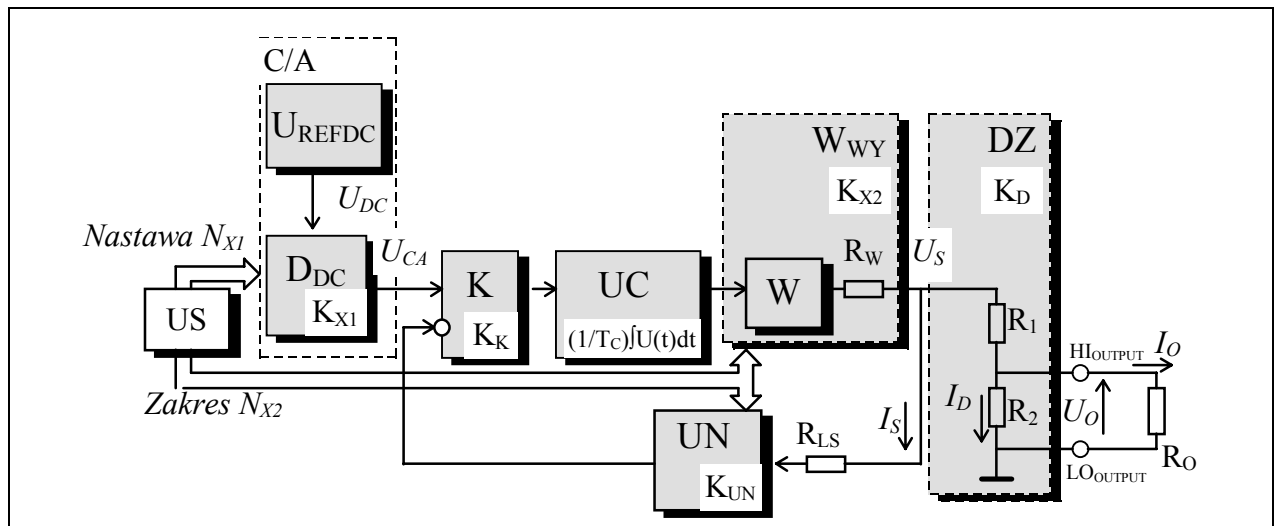
- błędem dodatkowym $\Delta U_O(\Delta I_O)$ spowodowanym zmianą ΔI_O prądu obciążenia w granicach znamionowego zakresu użytkowania lub
- rezystancją R_{OUT} (impedancją) wyjściową kalibratora.

Związek między omawianymi wielkościami jest następujący:

$$R_{OUT} = \frac{\Delta U_o(\Delta I_o)}{\Delta I_o} \quad (4)$$

Na rys.3 przedstawiono strukturę kalibratora napięć z dzielnikiem wyjściowym i z dwuprzewodowym podłączeniem obciążenia do zacisków wyjściowych kalibratora oznaczonych „HI_{OUTPUT}” i „LO_{OUTPUT}”, gdzie oznaczono:

- US -układ sterowania kalibratora zadający sygnały nastawy N_{X1} amplitudy i zakresu N_{X2} ,
- C/A -przetwornik cyfrowo-analogowy złożony z dzielnika D_{DC} napięcia stałego i źródła U_{REFDC} stałego napięcia odniesienia,
- K -komparator o współczynniku wzmocnienia równym K_K ,
- UC -układ całkujący o stałej czasowej równej T_C ,
- W_{WY} -wzmacniacz wyjściowy o współczynniku przetwarzania K_{X2} modelowany przez idealny (o zerowej rezystancji wyjściowej) wzmacniacz W i rezystor R_W reprezentujący rezystancję wyjściową wzmacniacza,
- DZ -dzielnik wyjściowy o współczynniku przetwarzania $K_D=R_2/(R_1+R_2)$,
- UN -układ normalizujący o współczynniku przetwarzania równym K_{UN} .



Rys.3. Struktura kalibratora napięć z dzielnikiem wyjściowym

Układ stabilizuje wartość napięcia U_S na wejściu dzielnika wyjściowego DZ. Jeżeli z zamkniętej pętli stabilizacji napięcia U_S zostanie usunięty układ całkujący UC, to struktura będzie mieć statyczny charakter regulacji i rzeczywistą charakterystykę przetwarzania daną wzorem

$$U_{OR} = \frac{K_D \cdot U_{CA} \cdot K_K \cdot K_{X2}}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} - \frac{I_o [R_W + R_1(1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2})] K_D}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \pm \frac{[I_S(R_{LS} \cdot K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2} + R_W) - I_D \cdot R_W] K_D}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \quad (5)$$

gdzie pierwszy składnik jest znamionową charakterystyką przetwarzania, drugi składnik jest błędem bezwzględnym zależnym od prądu obciążenia, a trzeci składnik jest błędem bezwzględnym niezależnym od obciążenia i może być uwzględniony w procesie wzorcowania kalibratora. Zatem

struktura z dzielnikiem wyjściowym i statyczną charakterystyką cechuje się błędem dodatkowym spowodowanym zmianą prądu ΔI_O obciążenia

$$\Delta U_O(\Delta I_O) = \frac{\Delta I_O [R_W + R_1(1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2})] K_D}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \quad (6)$$

oraz rezystancją wyjściową równą

$$R_{OUT} = \frac{R_W + R_1(1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2})}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \approx R_2 \quad (7)$$

Rzeczywista charakterystyka przetwarzania kalibratora wg rys.3 z dzielnikiem wyjściowym i astatyczną charakterystyką regulacji dana jest wzorem

$$U_{OR} = \frac{K_D \cdot U_{CA}}{K_{UN}} - \frac{I_O \cdot R_1 \cdot K_D}{K_{UN}} \pm I_S \cdot R_{LS} \cdot K_D \quad (8)$$

zatem struktura ta cechuje się błędem dodatkowym spowodowanym zmianą prądu ΔI_O obciążenia

$$\Delta U_O(\Delta I_O) = \frac{\Delta I_O \cdot R_1 \cdot K_D}{K_{UN}} \quad (9)$$

oraz rezystancją wyjściową równą

$$R_{OUT} = \frac{R_1}{K_{UN}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \approx R_2 \quad (10)$$

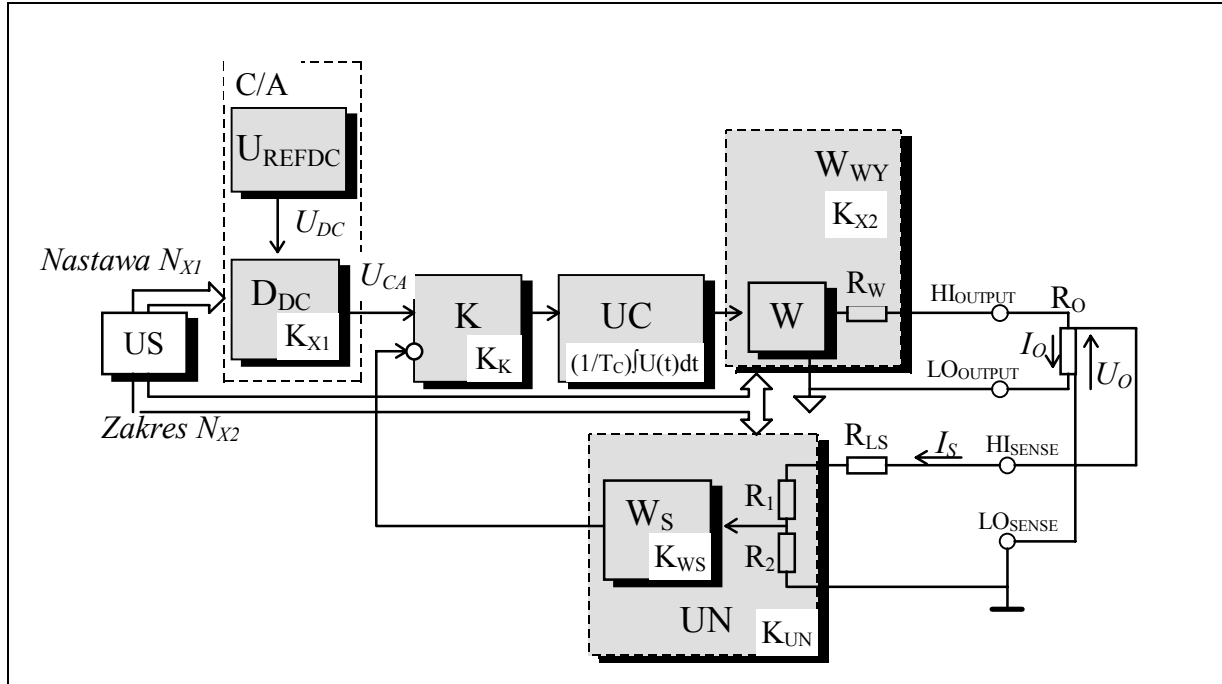
Analiza równań (6), (7), (9) i (10) prowadzi do wniosku, że kalibrator napięć zbudowany w oparciu o strukturę z dzielnikiem wyjściowym wg rys.3, który nie jest objęty pętlą sprzężenia zwrotnego, zarówno dla statycznej jak i astatycznej charakterystyki regulacji, cechuje się dużą wartością rezystancji wyjściowej w przybliżeniu równą rezystancji rezystora R_2 . Struktura z dzielnikiem wyjściowym zastosowana została w takich kalibratorach jak model 600 firmy Rotek [4], 5100 i 5700 firmy Fluke [5,6], 9823 firmy Time Electronics [7], 9100 firmy Wavetek [8] oraz SQ7000 firmy Inmel [9], w których dla zakresu 100mV rezystancja wyjściowa jest na poziomie 1...100 Ω , co o kilka rzędów przekracza wymaganie (3). Zatem struktura z dzielnikiem wyjściowym nie jest przydatna do badania miliwoltomierzy o dużym poborze prądu.

Analiza wpływu obciążania wyjścia - zamknięta struktura śledząca

Na rys.4 przedstawiono strukturę kalibratora napięć z czteroprzewodowym podłączeniem obciążenia do zacisków wyjściowych kalibratora oznaczonych „HI_{OUTPUT}” i „LO_{OUTPUT}” oraz do zacisków sprzężenia oznaczonych „HI_{SENSE}” i „LO_{SENSE}”. Przez obciążenie R_O płynie prąd obciążenia I_O zamykając się w obwodzie wyjściowym wzmacniacza. Obwód wejściowy układu normalizującego UN toru sprzężenia zwrotnego pobiera prąd I_S , którego wartość określa się następująco:

- ze wzoru $I_S = U_O / R_{INS}$, gdzie R_{INS} jest rezystancją wejściową obwodu sprzężenia zwrotnego, podawaną dla każdego zakresu. Przypadek ten dotyczy wykonania obwodu wejściowego w

- postaci dzielnika złożonego z rezystorów R_1 i R_2 , na wyjściu którego zazwyczaj włączany jest wzmacniacz separujący w postaci wtórnika napięciowego. Rezystancja R_{INS} jest równa sumie rezystancji rezystorów R_1 i R_2 . Rozwiązanie to jest stosowane dla zakresów 10V-100V-1000V,
- ze wzoru $I_S = \text{const}$ podawanego dla każdego zakresu. Przypadek ten dotyczy wykonania obwodu wejściowego w postaci wzmacniacza separującego o współczynniku wzmocnienia 1V/V-10V/V-100V/V. Rozwiązanie to jest stosowane dla zakresów 1V-0,1V-0,01V.



Rys.4. Zamknięta struktura śledząca astatyczna kalibratora napięć

Rzeczywista charakterystyka przetwarzania kalibratora wg rys.4 dana jest wzorem

$$U_{OR} = \frac{U_{CA}}{K_{UN}} \pm I_S \cdot R_{LS} \quad (11)$$

gdzie: U_{CA} - napięcie przetwornika C/A reprezentujące nastawę N_{X1} ,
 R_{LS} - rezystancja linii wejścia toru układu normalizującego reprezentująca rezystancje przewodów i rezystancje przełączników,
 $I_S \cdot R_{LS}$ - błąd bezwzględny znamionowej charakterystyki przetwarzania, który może być dowzorcowany w procesie wzorcowania kalibratora,
 $K_{UN} = K_{WS} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ i K_{WS} oznacza współczynnik wzmocnienia wzmacniacza W_S .

Ponieważ w równaniu (11) nie występuje składnik zależny od wartości prądu I_O obciążenia kalibratora, zatem dla zamkniętej struktury śledzącej z astatyczną charakterystyką regulacji błąd $\Delta U_O(\Delta I_O)$ dodatkowy spowodowany zmianą prądu obciążenia oraz rezystancja R_{OUT} wyjściowa są równe zero, co stanowi o dużej zalecie układu.

Jeżeli z toru głównego struktury wg rys.4 usunięty zostanie układ całkujący UC, to otrzymana zamknięta struktura śledząca statyczna kalibratora napięć będzie mieć rzeczywistą charakterystykę przetwarzania daną wzorem

$$U_{OR} = \frac{U_{CA}}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} - \frac{I_O \cdot R_W}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \pm \frac{I_S \cdot (R_{LS} \cdot K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2} + R_W)}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \quad (12)$$

gdzie pierwszy składnik jest znamionową charakterystyką przetwarzania, drugi składnik jest błędem bezwzględnym zależnym od prądu obciążenia, a trzeci składnik jest błędem bezwzględnym niezależnym od obciążenia i może być uwzględniony w procesie wzorcowania kalibratora. Zatem zamknięta struktura śledząca ze statyczną charakterystyką cechuje się błędem dodatkowym spowodowanym zmianą prądu ΔI_O obciążenia

$$\Delta U_O(\Delta I_O) = \frac{\Delta I_O \cdot R_W}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \quad (13)$$

oraz rezystancją wyjściową równą

$$R_{OUT} = \frac{R_W}{1 + K_{UN} \cdot K_K \cdot K_{X2}} \quad (14)$$

nawet dla czteroprzewodowego podłączenia obciążenia do zacisków wyjściowych kalibratora.

Analiza równań (11), (12), (13) i (14) prowadzi do wniosku, że kalibrator napięć zbudowany w oparciu o zamkniętą strukturę śledzącą wg rys.4, zarówno dla statycznej jak i astatycznej charakterystyki regulacji, cechuje się małą wartością rezystancji wyjściowej w przybliżeniu równą zero. Zamknięta struktura śledząca z astatyczną charakterystyką regulacji zastosowana została w krajowych kalibratorach uniwersalnych typu GA1 firmy Lumel [10] i C101 firmy Calmet [11], w których dla zakresu 100mV rezystancja wyjściowa jest na poziomie 0,0001 Ω , co z wielokrotnym zapasem spełnia wymaganie (3). Zatem zamknięta struktura śledząca z astatyczną charakterystyką regulacji i z możliwością czteroprzewodowego podłączenia obciążenia jest korzystna przy badaniu miliwoltomierzy o dużym poborze prądu.

Ocena możliwości badania miliwoltomierzy o dużym poborze prądu za pomocą kalibratorów

Szerokozakresowe źródła napięć i prądów stałych i przemiennych przeznaczone są do badania szerokiego asortymentu aparatury pomiarowej, w tym miliwoltomierzy. W tabl.1 zestawiono te parametry znanych kalibratorów uniwersalnych, które są istotne przy badaniu miliwoltomierzy o dużym poborze prądu wg wymagań (2) i (3) na przykładzie miliwoltomierza magnetoelektrycznego 60mV/10mA klasy 1,5. Praktycznie wszystkie kalibratory spełniają wymagania dokładnościowe zarówno przy pracy na zakresie 100mV, jak i na wyższym zakresie 1V. Wszystkie krajowe kalibratory uniwersalne oraz model 5700 firmy Fluke mają wystarczająco małą rezystancję wyjściową przy pracy na zakresie 1V i możliwość czteroprzewodowego podłączenia obciążenia, co umożliwia badanie omawianych mierników. Cztery pozostałe kalibratory zagraniczne mają zbyt dużą rezystancję wyjściową dla zakresów 100mV i 1V i nie spełniają wymagań badania mierników o dużym poborze prądu. Na uwagę zasługują dwa krajowe kalibratory GA1 i C101 o dużej mocy wyjściowej, które charakteryzują się niską rezystancją wyjściową na wszystkich zakresach napięciowych, w tym i dla zakresu 100mV.

TABLICA 1. Parametry kalibratorów uniwersalnych na tle potrzeb badania miliwoltomierzy 60mV/10mA kl.1,5

Parametr	Kalibrator uniwersalny typu									Wyma- ganie
	GA1	SQ10	SQ7000	C101	600	5100	5700	9823	9100	
Zakres 100mV										
Rezystancja wyjściowa R_{OUT} [Ω]	0,0001	0,1	10	0,0001	10	50	50	10	2	max 0,018
Błąd napięcia wyjściowego ΔU_O [μV]	60...90	10...40	5...7	10...40	6...7	7...10	0,5...1	4...5	4...8	max 180
Prąd wyjściowy I_O [mA] przy błędzie $\Delta U_O(I_O) \leq 180 \mu V$	40	1,8	0,0018	20	0,0018	0,0004	0,0004	0,0018	0,09	min 10
Cztero-przewodowe łączenie obciążenia	tak	nie	nie	tak	nie	nie	nie	nie	nie	tak
Zakres 1V										
Rezystancja wyjściowa R_{OUT} [Ω]	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	1	50	0,004	0,1	2	max 0,018
Błąd napięcia wyjściowego ΔU_O [μV]	150...180	40...52	10...12	40...52	19...20	25...28	1...2	5...6	42...45	max 180
Prąd wyjściowy I_O [mA] przy błędzie $\Delta U_O(I_O) \leq 180 \mu V$	50	1000	25	1100	0,18	0,0004	45	1,8	0,09	min 10
Cztero - przewodowe łączenie obciążenia	tak	tak	tak	tak	tak	nie	tak	tak	nie	tak

Wnioski

W większości kalibratorów uniwersalnych niskonapięciowe zakresy realizowane są w oparciu o strukturę kalibratora napięć z dzielnikiem wyjściowym, która zarówno dla statycznej, jak i astatycznej charakterystyki regulacji nie pozwala uzyskać małe rezystancje wyjściowe. Uzyskanie dużej obciążalności wyjścia wymaga stosowania zamkniętej struktury śledzącej - najlepiej z astatyczną charakterystyką regulacji i czteroprzewodowego łączenia obciążenia. Część krajowych kalibratorów ma dużą obciążalność wyjścia dla wszystkich zakresów napięciowych, pozostałe - dla zakresów powyżej 1V. Większość zagranicznych kalibratorów uniwersalnych ma dużą rezystancję wyjściową i słabą obciążalność wyjścia. Niektóre firmy traktują rezystancję wyjściową jako „parametr drugorzędny” i nie podają w kartach katalogowych, które są podstawą do podejmowania decyzji o zakupie kalibratora. Postępowanie takie jest poprawne, jeżeli kalibrator ma „przyzwoicie” małą wartość rezystancji wyjściowej, która niezbyt istotnie ogranicza zakres stosowania. W

przeciwnym przypadku użytkownik dopiero z instrukcji obsługi kalibratora dowiaduje się o „słabych” stronach zakupionego przyrządu. Przy stosowaniu kalibratora do badania szerokiego asortymentu aparatury zagadnienie rezystancji wyjściowej kalibratora jest istotne. Znane są bowiem przykłady, że zagraniczny kalibrator ma rzeczywistą rezystancję wyjściową dla wszystkich zakresów napięciowych na poziomie 2Ω i katalogową obciążalność 20mA, co po przekształceniu wzoru (3) pozwala sprawdzać woltomierz o zakresie 1V nieistniejącej klasy dokładności 20,0 przy specyfikowanych błędach tego kalibratora na poziomie setnych części procenta.

LITERATURA

- [1] Elektryczne mierniki tablicowe analogowe serii „A”. Karta katalogowa „Lumel”, Zielona Góra.
- [2] Mierniki tablicowe analogowe typu MA16. Karta katalogowa „Lumel”, Zielona Góra.
- [3] Elektrische Messinstrumente. Katalog „Era”, Warszawa.
- [4] *Series 600 Wide Band Calibrator*. Operating and Service Manual. Rotek Instrument Corp., 5th printing, USA
- [5] *5100 Series B Calibrators*. Instruction Manual. John Fluke Mfg. Co. Inc., USA.
- [6] *5700A Calibrator*. Service Manual. Fluke PN791996, 1996, USA.
- [7] *9823 Multi-Function Calibrator*. Time Electronics Limited, Wielka Brytania.
- [8] *The Model 9100 Universal Calibration System*. User’s Handbook, Wavetek, 1996, USA.
- [9] *Kalibrator SQ7000*. Instrukcja obsługi. Inmel, Zielona Góra, 1996.
- [10] *Kalibrator typu GA-I*. Dokumentacja techniczna. Lumel, Zielona Góra, 1982.
- [11] *Kalibrator napięć i prądów stałych i przemiennych typu C-101*. Dokumentacja konstrukcyjna. Calmet, Zielona Góra, 1996.