

**AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA**  
**Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki**  
**Katedra Elektroniki**

*Laboratorium*

*Eksploatacji Systemów  
Elektronicznych i Telekomunikacyjnych*

Materiały pomocnicze

Temat: Pomiary wielkości bardzo małych i bardzo dużych

Na podstawie wybranych rozdziałów książki „Low Level Measurements” firmy Keithley

(Do użytku wewnętrznego)

Prowadzący:  
Dr inż. Wojciech Maziarz

**Kraków 2007**

## Spis treści:

<b>1. Podstawowe pojęcia .....</b>	<b>4</b>
1.2 Dokładność miernika analogowego.....	4
1.1 Dokładność .....	4
1.3 Dokładność miernika cyfrowego.....	4
1.4 Rozdzielczość .....	5
1.5 Czułość.....	5
1.6 Dokładność absolutna i relatywna.....	5
1.7 Stabilność transferu .....	5
1.8 Wyliczanie błędu na podstawie dokładności pomiaru.....	5
<b>2. Wpływ temperatury i czasu na poprawność pomiarów. 6</b>	
2.1 Współczynnik temperaturowy .....	6
2.2 Wpływ czasu.....	6
<b>3. Zakłócenia i ich tłumienie .....</b>	<b>6</b>
3.1 Współczynnik tłumienia sygnału nałożonego NMRR.....	6
3.2 Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego CMRR .....	7
3.3 Właściwości zakłóceń .....	7
<b>4. Podstawowe zasady konstrukcji obwodów w urządzeniach pomiarowych .....</b>	<b>7</b>
4.1 Układ woltomierza.....	8
4.2 Przedwzmacniacz do nanowoltomierza .....	8
4.3 Układ amperomierza .....	8
4.5 Amperomierz ze sprzężeniem zwrotnym .....	9
4.6 Pikoamperomierze o dużej szybkości działania.....	10
4.7 Pikoamperomierz logarytmiczny.....	10
4.8 Układ miernika ładunku. ....	11
4.9 Układ omomierza.....	12
4.9.1 Amperomierz i źródło napięcia .....	12
4.9.2 Omomierz z wbudowanym źródłem prądu .....	12
4.9.3 Omomierz pracujący w trybie „guarded ohms” .....	13
4.9.4 Woltomierz z zewnętrznym źródłem prądu.....	13
4.9.5 Omomierz DMM.....	14
4.9.6 Mikroomomierz .....	15
<b>5. Wysokoimpedancyjne pomiary napięcia .....</b>	<b>16</b>
5.1 Błędy wynikające z obciążenia .....	16
5.1.1 Obciążenie rezystancją wejściową ( $R_{IN}$ ).....	16

5.1.2	Obciążenie wejściowym prądem niezrównoważenia ( $I_{\text{OFFSET}}$ ).....	17
5.1.3	Obciążenie rezystancją bocznikującą ( $R_{\text{SHUNT}}$ ).....	18
5.1.4	Obciążenie pojemnością bocznikującą.....	19
5.2	<i>Rezystancja izolacji</i> .....	21
5.2.1	<i>Wybór najlepszego izolatora</i> .....	21
<b>6.</b>	<b>Pomiar prądu</b> .....	<b>21</b>
6.1	<i>Pomiar prądu za pomocą miernika ładunku</i> .....	22
<b>7.</b>	<b>Pomiary dużych rezystancji</b> .....	<b>22</b>
7.1	<i>Metoda stałego napięcia</i> .....	22
7.2	<i>Metoda stałego prądu</i> .....	23
7.3	<i>Użycie woltomierza i zewnętrznego źródła prądu</i> .....	24
7.4	<i>Użycie omomierza</i> .....	24
7.5	<i>Obciążenie miernika</i> .....	25
7.6	<i>Guarding</i> .....	25
7.7	<i>Czas ustalania</i> .....	26
7.8	<i>Charakterystyka rezystorów o bardzo dużych wartościach</i> .....	27
<b>8.</b>	<b>Pomiary ładunku</b> .....	<b>27</b>
8.1	<i>Źródła błędów</i> .....	27
8.2	<i>Wejściowy prąd niezrównoważenia</i> .....	27
8.3	<i>Obciążenie napięciowe (Voltage Burden)</i> .....	28
8.4	<i>Generowane prądy</i> .....	28
8.5	<i>Kontrola zera</i> .....	28
<b>9.</b>	<b>Podsumowanie</b> .....	<b>29</b>
9.1	<i>Połączenia</i> .....	29
9.2	<i>Interferencja i ekranowanie</i> .....	29
9.3	<i>Wpływ otoczenia na pomiary</i> .....	30
9.3.1	<i>Temperatura i jej stabilność</i> .....	30
9.3.2	<i>Wilgotność</i> .....	30
9.4	<i>Zależności czasowe</i> .....	30

## **1. Podstawowe pojęcia**

**czułość** – najmniejsza zmiana sygnału, jaka może być wykryta

**rozdzielczość** – najmniejsza część sygnału, jaka może zostać zaobserwowana

**powtarzalność** – zbliżona wartość wyników kolejnych pomiarów przeprowadzanych w tych samych warunkach

**odtworzalność** – bliskość pomiędzy wynikami pomiarów o tej samej wartości przeprowadzanych w zmiennych warunkach

**dokładność bezwzględna** – różnica pomiędzy wynikiem pomiaru a jego poprawną, bądź też przyjętą za wzorcową, wartością

**dokładność względna** – różnica pomiędzy wynikiem pomiaru a jego poprawną wartością odniesiona w stosunku do wartości poprawnej

**błąd** – odchylenie pomiaru od jego prawidłowej wartości

**błąd przypadkowy** – średnia wartość z dużej liczby pomiarów obciążonych tym błędem jest porównywalna z wartością poprawną

**błąd systematyczny** – średnia wartość z dużej liczby pomiarów obciążonych tym błędem odbiega od wartości poprawnej

**niepewność** – założenie możliwego błędu w pomiarach.

**Precyzja** jest pojęciem bardziej jakościowym niż wszystkie powyższe. Często jest wprowadzana w kontekście powtarzalności lub odtwarzalności, nie powinna być jednak zastępowana przez dokładność.

### 1.1 Dokładność

Jednym z najważniejszych czynników stanowiącym o poprawności pomiarów jest dokładność. Dokładność samego urządzenia może być specyfikowana na kilka sposobów: jako procent pełnego zakresu, procent z odczytu lub kombinacja obu.

### 1.2 Dokładność miernika analogowego

Zwykle dokładność miernika analogowego jest podawana jako procent z pełnej skali, np. 1%.

Należy zwrócić również uwagę na fakt, że dokładność odczytu maleje, gdy maleje stosunek wartości mierzonej do pełnego zakresu urządzenia.

Np. jeżeli dokładność wynosi 1% pełnego zakresu, a zakres wynosi 1V to błąd odczytu wartości 0,5V przyjmuje wartość 2%.

### 1.3 Dokładność miernika cyfrowego

Dokładność miernika cyfrowego jest zwykle określana jako procent z odczytu plus procent z zakresu (lub ilość stanów najmniej znaczącej cyfry miernika). Np. dokładność

typowego miernika cyfrowego wynosi  $\pm(0,005\% \text{ odczytu} + 0,002\% \text{ zakresu})$ . Procent z odczytu ma największe znaczenie, gdy odczyt jest zbliżony do pełnego zakresu miernika, natomiast w sytuacji odwrotnej na błąd najbardziej wpływa procent z zakresu. Dokładność może być także podawana w jednostkach *ppm* (*parts per million* – części na milion).

#### 1.4 Rozdzielczość

Rozdzielczość przyrządu cyfrowego jest zdeterminowana przez ilość stanów (znaków) możliwych do wyświetlenia. Typowy miernik cyfrowy może wyświetlać 4,5 cyfry, oznacza to, że cztery cyfry są wyświetlane w pełni (tzn. od 0 do 9), a jedna cyfra przyjmuje tylko wartości 0 i  $\pm 1$ . W ten sposób wyświetlacz 4,5-cyfrowy może pokazywać wartości od 0 do 19999. Rozdzielczość jest stosunkiem najmniejszej wartości, o jaką może się zmieniać wyświetlana wartość do maksymalnej możliwej do uzyskania na wyświetlaczu liczby stanów (w rozważanym przypadku: 1/20 000).

Generalnie im większa rozdzielczość tym wyższa dokładność.

#### 1.5 Czulość

Czulość pomiaru to najmniejsza zmiana mierzonego sygnału jaka może zostać zaobserwowana. Np. czulość pomiaru napięcia może mieć wartość  $1\mu\text{V}$ , co oznacza, że zmiana sygnału wejściowego o mniej niż  $1\mu\text{V}$  nie wpłynie na odczyt.

Całkowita czulość przyrządu pomiarowego zależy od jego rozdzielczości oraz najmniejszego zakresu pomiaru. Przykładowo czulość 5,5-cyfrowego miernika cyfrowego (*DMM – Digital Meter*) z zakresem pomiaru wynoszącym  $200\text{mV}$  wynosi  $1\mu\text{V}$ .

#### 1.6 Dokładność absolutna i relatywna

Dokładność absolutna (bezwzględna) jest pomiarem dokładności przyrządu pomiarowego porównywalnym bezpośrednio z podstawowym wzorcem *NIST* (*National Institute of Standards and Technology*).

Dokładność relatywna (względna) wyraża dokładność przyrządu w odniesieniu do wzorca wtórnego.

Dokładność absolutna, podobnie jak relatywna, może być wyrażona jako  $\pm(\% \text{ odczytu} + \text{ilość stanów})$  lub  $\pm(\text{ppm odczytu} + \text{ppm zakresu})$ .

#### 1.7 Stabilność transferu

Stabilność transferu jest szczególnym przypadkiem dokładności relatywnej. Określa ona odniesienie dokładności pomiaru do wtórnego wzorca, jednak przez krótki okres czasu oraz przy bardzo małych dopuszczalnych zmianach temperatury (typowo taki pomiar trwa 5 minut i dopuszcza zmiany temperatury nie większe niż  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Stabilność transferu jest bardzo użyteczna w sytuacjach, gdy pomiar o wysokiej dokładności musi być przeprowadzony w odniesieniu do znanego wzorca wtórnego.

#### 1.8 Wyliczanie błędu na podstawie dokładności pomiaru

Dla przykładu, w celu wyliczenia błędu pomiaru, zakładamy następujące parametry pomiaru:

Dokładność: +/- (25ppm odczytu + 5ppm zakresu)

Zakres: 2V

Sygnal wejściowy: 1,5V

Błąd jest wyliczany następująco:

$$\text{Błąd} = 1,5(25 \cdot 10^{-6}) + 2(5 \cdot 10^{-6}) = 47,5 \cdot 10^{-6}$$

Faktycznie mierzony sygnał ma więc wartość 1,5V +/- 47,5μV, a błąd wynosi:

$$\frac{47,5 \mu\text{V}}{1,5\text{V}} = 0,003\%$$

## **2. Wpływ temperatury i czasu na poprawność pomiarów**

### 2.1 Współczynnik temperaturowy

Temperatura w jakiej przeprowadzane są pomiary może wpłynąć na ich dokładność. Z tej przyczyny specyfikacja przyrządów pomiarowych określa również dopuszczalny zakres temperatury, w której mogą być one wykonywane. Zwykle mieści się on w granicach od 18°C do 28°C. Po przekroczeniu tego zakresu temperatura wpływa na poprawność pomiaru według zależności:

$$\text{+/-}(0,005\% \text{ odczytu} + 0,1 \text{ ilości stanów LSB}) / ^\circ\text{C}$$

lub

$$\text{+/-}(5\text{ppm odczytu} + 1\text{ppm zakresu}) / ^\circ\text{C}.$$

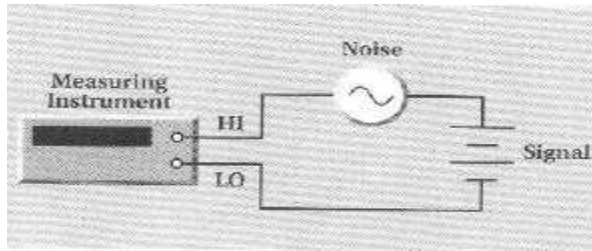
### 2.2 Wpływ czasu

Większość przyrządów elektronicznych, włączając pikoamperomierze i nanowoltomierze, a także mierniki cyfrowe, jest podatnych na zmiany ich dokładności w miarę upływu czasu, niezależnie od tego czy były eksploatowane czy też nie. Dlatego w specyfikacji przyrządów pomiarowych zwykle podawany jest okres czasu, po przekroczeniu którego dokładność pomiaru wykonywanego tym przyrządem nie może być zagwarantowana przez producenta. Dla zachowania wysokich parametrów i założonej dokładności przyrząd taki powinien być okresowo kalibrowany („strojony” do wzorca).

## **3. Zakłócenia i ich tłumienie**

### 3.1 Współczynnik tłumienia sygnału nałożonego NMRR

NMRR (*Normal Mode Rejection Ratio*) definiuje jak dobrze urządzenie tłumie zakłócenia pojawiające się pomiędzy jego wejściami HI i LO . Jak przedstawia *rys.1* zakłócenie jest błędnym sygnałem dodawanym do żądanego sygnału wejściowego.



**Rys. 1.** Przykład zakłócenia dodającego się do sygnału mierzonego.

NMRR zdefiniowany jest jako stosunek wskazania woltomierza przy pomiarze napięcia stałego o wartości równej amplitudzie napięcia zmiennego (zakłócającego) do wskazania woltomierza przy pomiarze napięcia zmiennego.

Najczęściej współczynnik ten jest podawany w decybelach:

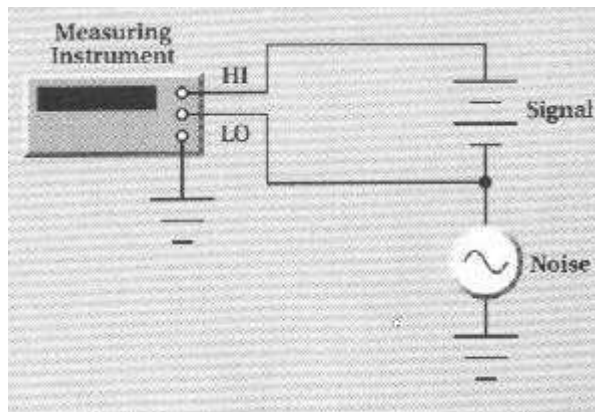
$$NMRR = 20 \log |U_0|/|U_z|,$$

$U_0$  – stałe napięcie

$U_z$  – zmienne napięcie.

NMRR jest podawany dla poszczególnych częstotliwości lub też zakresów częstotliwości (50Hz, 60Hz, zakłócenia wielkich częstotliwości). Współczynnik ten można zmniejszyć poprzez umiejętne ekranowanie, wiele urządzeń ma wbudowany filtr przeznaczony specjalnie do tego celu.

### 3.2 Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego CMRR



**Rys. 2.** Sygnał wspólny.

CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) definiuje, jak dobrze urządzenie tłumi zakłócenia pojawiające się pomiędzy jego wejściami a masą.

Ma on znacznie mniejszy wpływ na poprawność pomiaru niż NMRR, jednakże może być ważnym czynnikiem podczas wykonywania bardzo czułych pomiarów. Współczynnik CMRR można znacznie polepszyć poprzez ekranowanie tylko w jednym punkcie systemu testowego.

### 3.3 Właściwości zakłóceń

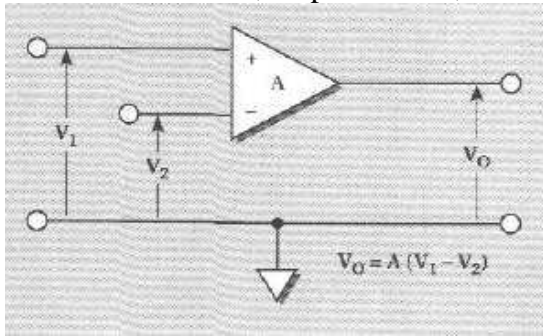
Zarówno NMRR jak i CMRR są specyfikowane głównie dla częstotliwości 50Hz oraz 60Hz (CMRR dodatkowo także dla prądu stałego). Typowe wartości tych współczynników to: >80dB dla NMRR oraz >120dB dla CMRR.

Podniesienie wartości współczynnika tłumienia o 20dB powoduje 10-krotne zmniejszenie napięcia (bądź prądu) zakłócającego. Jeżeli więc NMRR wynosi 80dB oznacza to, że sygnał zakłócający został zmniejszony 10 000 razy.

## **4. Podstawowe zasady konstrukcji obwodów w urządzeniach pomiarowych**

Układy wykorzystywane przy projektowaniu wielu urządzeń pomiarowych małych wartości elektrycznych (low-level), generalnie używają obwodów, które mogą być rozumiane

jako wzmacniacze operacyjne (w.o.). Taka sytuacja ma miejsce niezależnie od tego czy chodzi o woltomierze, amperomierze, omomierze czy też mierniki ładunku.



**Rys. 3.** Podstawowy wzmacniacz operacyjny.

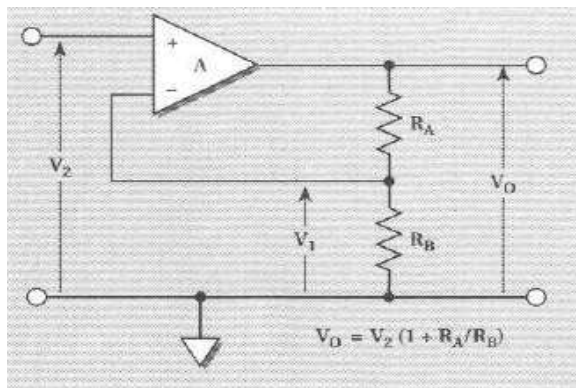
Obok przedstawiony jest wzmacniacz operacyjny, którego napięcie wyjściowe opisane jest zależnością :

$$V_O = A(V_1 - V_2)$$

Należy pamiętać, że w.o. posiada następujące cechy:

- Jego wzmocnienie (A) jest bardzo duże 10 000 ÷ 100 000, a czasami nawet 1 000 000
- Prąd wpływający do jego wejść jest bardzo mały i w idealnym przypadku wynosi 0
- Efekt ujemnego sprzężenia zwrotnego odpowiednio zastosowanego ma za zadanie zmniejszenie różnicy ( $V_1 - V_2$ ) do 0

#### 4.1 Układ woltomierza



**Rys. 4.** Wzmacniacz napięcia.

W takiej konfiguracji w.o. staje się wzmacniaczem napięcia. Opierając się na przytoczonych wcześniej cechach w.o. zauważamy, że prąd płynący przez oba rezystory jest taki sam, zatem napięcie wyjściowe może być opisane zależnością :

$$V_O = V_2 (1 + R_A/R_B)$$

Układ taki nie obciąża źródła napięcia  $V_2$ , gdyż prąd przesunięcia wpływający do wejścia w.o. jest bardzo mały. W wielu woltomierzach wartość rezystancji  $R_A$  jest mała, a rezystora  $R_B$  nie ma (rozwarć), co w rezultacie daje wzmocnienie układu równe 1.

#### 4.2 Przedwzmacniacz do nanowoltomierza

Do tej funkcji może zostać użyty taki sam układ, jak opisany powyżej. W tym przypadku ustawiamy jego wzmocnienie za pomocą rezystorów  $R_A$  i  $R_B$  na standardową wartość 1000. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie nanowoltomierza i woltomierza jest różne i stąd też wynika różnica w wykorzystywanych w nich wzmacniaczach operacyjnych. Podczas gdy w woltomierzu w.o. powinien mieć jak najmniejszy wejściowy prąd niezrównoważenia i jak największą wejściową impedancję, tak w nanowoltomierzu zależy nam na jak najmniejszym wejściowym poziomie szumu (input noise voltage).

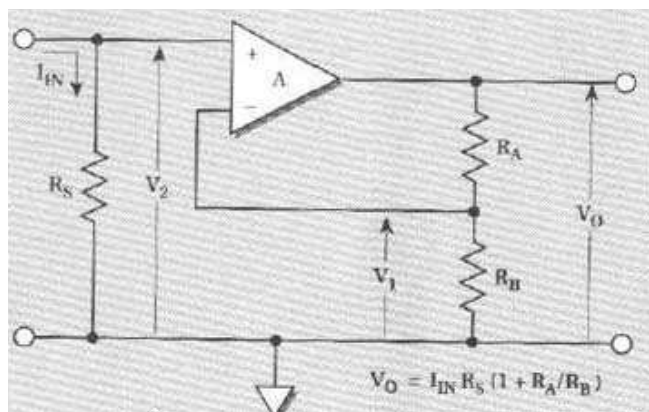
#### 4.3 Układ amperomierza

Istnieją dwie podstawowe techniki używane przy pomiarze prądu:

- Z prądem bocznikowanym (tryb NORMALNY)
- Ze sprzężeniem zwrotnym (tryb SZYBKII)

DMM-y i starsze amperomierze wykorzystują tryb normalny, podczas gdy pikoamperomierze i nowe elektrometry (urządzenia pomiarowe wielofunkcyjne) wykorzystują tryb szybki.

#### 4.4 Amperomierz z prądem bocznikowanym



Rys. 5. Amperomierz z prądem bocznikowanym.

Na schemacie widać, że aby uzyskać amperomierz, wystarczy zbocznikować wejście za pomocą rezystora  $R_S$ . Wejściowy prąd  $I_{IN}$  płynie przez ten właśnie opornik wywołując na nim spadek napięcia  $V_2$ . Analogicznie jak w układzie woltomierza (rys.4), napięcie wyjściowe jest opisane następująco:

$$V_O = I_{IN} R_S (1 + R_A/R_B)$$

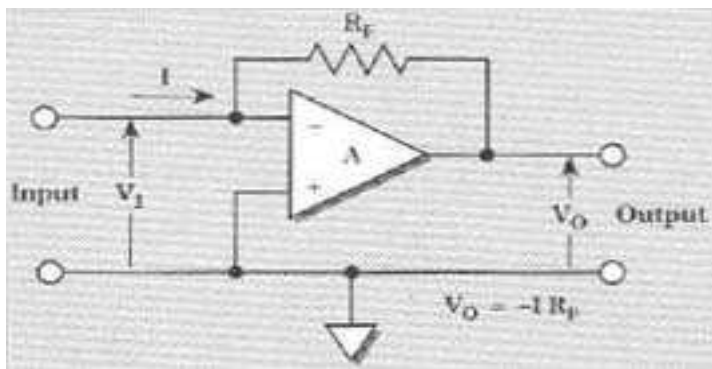
Istnieje kilka przyczyn, dla których lepiej jest używać małych wartości rezystancji  $R_S$ .

- Mają one większą dokładność, lepszą stabilność czasową i temperaturową oraz lepszy współczynnik napięciowy niż rezystory o dużych wartościach
- Mała wartość rezystancji zmniejsza wejściową stałą czasową układu, co w rezultacie daje szybszy czas odpowiedzi urządzenia pomiarowego
- Mała rezystancja powoduje mały spadek napięcia, co jest ważne przy amperomierzach, które w idealnym przypadku powinny stanowić zwarcie

Trzeba jednak wiedzieć, że używanie elektrometrów na ich najwrażliwszych zakresach wprowadza szum i dryf zera w urządzeniach pomiarowych. Dodatkowo zostało dowiedzione, że prąd szumu Johnsona (*Johnson current noise*) zmniejsza się wraz z rosnącą wartością rezystancji. Z tego też powodu wartość opornika  $R_S$  nie może być za mała. Dlatego częstym rozwiązaniem jest taki dobór tego rezystora bocznikującego, aby w efekcie uzyskać na wyjściu układu maksymalne napięcie wynoszące 1V (przy maksymalnym możliwym do pomiaru prądzie).

Układy wykorzystujące rezystor bocznikujący (tryb normalny) są wykorzystywane przede wszystkim w starszych elektrometrach, gdzie pojemność kabli i źródeł wywołuje problemy przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego (tryb szybki).

#### 4.5 Amperomierz ze sprzężeniem zwrotnym



Rys. 6. Amperomierz ze sprzężeniem zwrotnym.

W takiej konfiguracji wejściowy prąd  $I$  płynie przez rezystor w pętli sprzężenia zwrotnego  $R_F$ . Wejściowy prąd niezrównoważenia w.o. jest pomijalnie mały i praktycznie nie zmienia wartości prądu  $I$ . Napięcie wyjściowe w tym układzie może być opisane następująco:

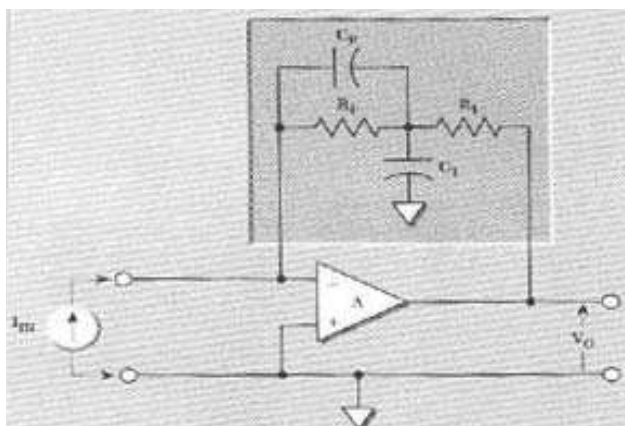
$$V_O = -IR_F$$

W ten sposób napięcie wyjściowe jest miarą wejściowego prądu, a ogólna wrażliwość układu jest determinowana przez rezystor  $R_F$ . Bardzo małe napięcie  $V_1$  oraz szybki czas narastania są uzyskane przez wykorzystanie bardzo dużego wzmocnienia w.o.

Wzmocnienie układu przy zastosowaniu do pikoamperomierza można uzyskać tak samo jak w przypadku woltomierza za pomocą rezystorów  $R_A$  i  $R_B$  (patrz: schemat woltomierza z rys.4). Wtedy napięcie wyjściowe jest opisane następująco:

$$V_O = -IR_F (1 + R_A/R_B)$$

#### 4.6 Pikoamperomierze o dużej szybkości działania

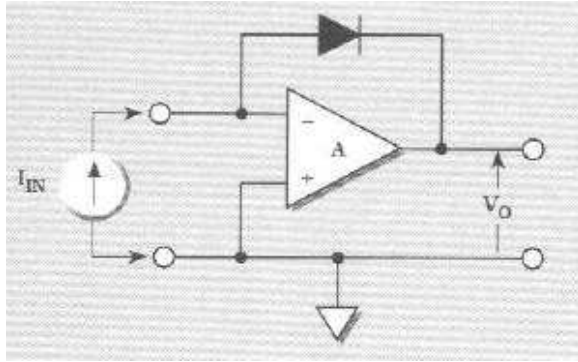


Rys. 7. Neutralizacja pojemności bocznikującej.

Czas narastania sygnału w tym układzie jest limitowany przez stałą czasową, określaną przez rezystor sprzężenia zwrotnego  $R_F$  i jakąkolwiek bocznikującą pojemność pasozytniczą  $C_F$ . Pierwszym krokiem do uzyskania szybkiego układu, jest minimalizacja niepożądanych pojemności bocznikujących przez odpowiednie mechaniczne zaprojektowanie pikoamperomierza.

Pozostałą pojemność bocznikującą można efektywnie zneutralizować przez nieznaczną modyfikację pętli sprzężenia zwrotnego, jak to jest pokazane na powyższym rysunku. Jeśli stała czasowa  $R_1 C_1$  jest równa stałej czasowej  $R_F C_F$ , wtedy cała gałąź sprzężenia zwrotnego ma charakter czysto rezystancyjny i wynosi  $R_F$ . Dopasowanie stałych czasowych w tym przypadku jest dość proste, gdyż występujące pojemności  $C_F$  oraz  $C_1$  mają stałą wartość i nie zależą od pojemności wejściowej.

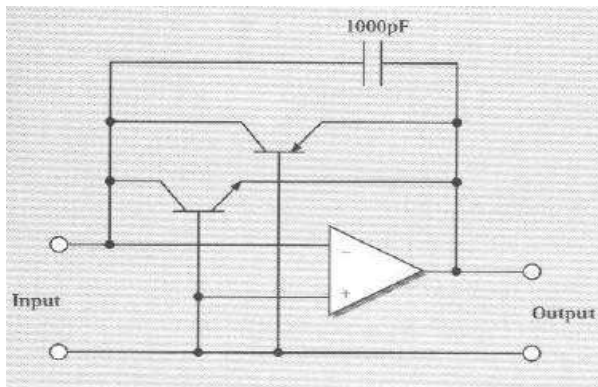
#### 4.7 Pikoamperomierz logarytmiczny



Rys. 9. Pikoamperomierz logarytmiczny.

Logarytmiczny pikoamperomierz może być uzyskany przez zastąpienie rezystora  $R_F$  w pętli sprzężenia zwrotnego, diodą lub tranzystorem posiadającymi logarytmiczną zależność prądowo-napięciową. Wtedy napięcie wyjściowe jest równe logarytmowi z prądu wejściowego. W rezultacie kilka dekad prądu może być odczytywanych na urządzeniu pomiarowym bez zmieniania jego zakresu, co jest bardzo wygodną cechą.

Wadą tego rozwiązania jest jednak utrata dokładności i rozdzielczości. Dlatego w niektórych pikoamperomierzach cyfrowych wypracowano kompromis, łączący oba powyższe rozwiązania tworząc automatyczne skalowanie oraz cyfrową konwersję logarytmiczną.



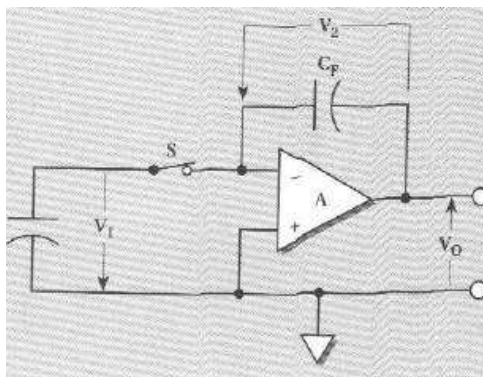
Rys. 9. Pikoamperomierz logarytmiczny.

Jeśli w pętli sprzężenia zwrotnego włączymy dwie diody równolegle i przeciwsobnie (*back-to-back*), wtedy taki układ może pracować z sygnałami wejściowymi o każdej polaryzacji. Nieco lepsze parametry można uzyskać zastępując diody tranzystorami odpowiednio NPN i PNP jak to jest pokazane na rysunku obok.

#### 4.8 Układ miernika ładunku.

Miernik ładunku służy do pomiaru ładunku elektrycznego, jaki jest zmagazynowany w kondensatorze, albo który mógł zostać wygenerowany w trakcie pewnych procesów.

Dla naładowanego kondensatora zachodzi zależność:  $Q=CV$ , gdzie  $Q$  - ładunek,  $C$  - pojemność,  $V$  - napięcie na kondensatorze.



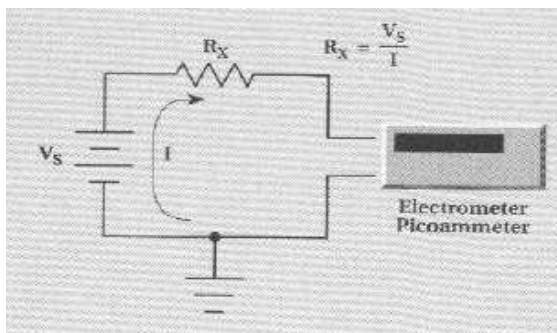
Rys. 10. Miernik ładunku.

Aby zmierzyć ładunek zgromadzony w badanym urządzeniu, trzeba go najpierw przesłać do kondensatora o znanej pojemności i wtedy po zmierzeniu na nim napięcia, możemy wykorzystać powyższą zależność. Elektrometr nadaje się idealnie do tego typu pomiarów, ponieważ znikomy prąd niezrównoważenia w.o. praktycznie nie wpływa na wynik pomiaru, a jego duża impedancja wejściowa nie pozwala na rozładowanie się mierzonego kondensatora.

Na rysunku nr 10 przedstawiony jest schemat omawianego urządzenia. Wejściowa pojemność w takiej konfiguracji wynosi  $AC_F$ . Z tego powodu odpowiednio duże jej wartości uzyskiwane są przy zastosowaniu rozsądnej pojemności  $C_F$ .

## 4.9 Układ omomierza

### 4.9.1 Amperomierz i źródło napięcia



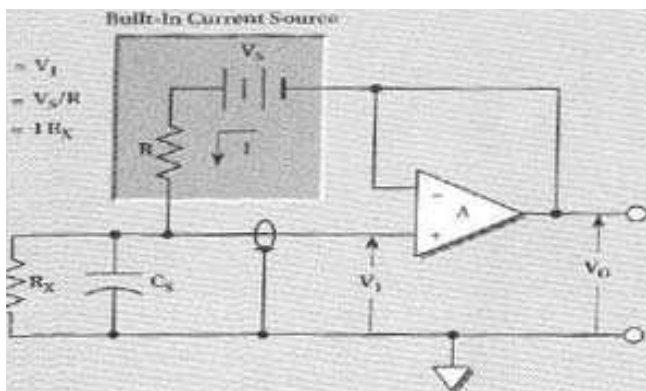
**Rys. 11.** Wykorzystanie do pomiaru zewnętrznego źródła napięcia.

W tej konfiguracji źródło napięcia  $V_S$  jest połączone szeregowo z mierzoną rezystancją  $R_X$  oraz z amperomierzem. Ponieważ impedancja amperomierza jest bardzo mała, praktycznie całe napięcie  $V_S$  odkłada się na nieznannej rezystancji  $R_X$ , którą wyliczamy z prawa Ohma:  $R_X = V_S/I$ .

Zaletą tej metody jest to, że pomiar jest szybki i w zależności od napięcia zasilania oraz materiałów izolacyjnych, mogą być mierzone bardzo duże rezystancje. Jeśli dodatkowo zastosujemy regulowane źródło napięcia, możemy wyznaczyć bezpośrednio zależność napięciową badanej rezystancji.

Przy większości elektrometrów metoda ta wymaga dwóch urządzeń. Istnieją jednak takie, które mają dodatkowo wbudowane źródło napięcia i mogą wyznaczyć rezystancje bezpośrednio.

### 4.9.2 Omomierz z wbudowanym źródłem prądu



Na schemacie przedstawiona jest podstawowa konfiguracja omomierza. Wbudowane źródło prądu stałego uzyskane jest za pomocą źródła napięcia  $V_S$  oraz rezystancji  $R$  (odpowiednio dużej), wymuszając przyływ znanego prądu przez mierzoną rezystancję  $R_X$ . Jej wartość wyznaczana jest z zależności:

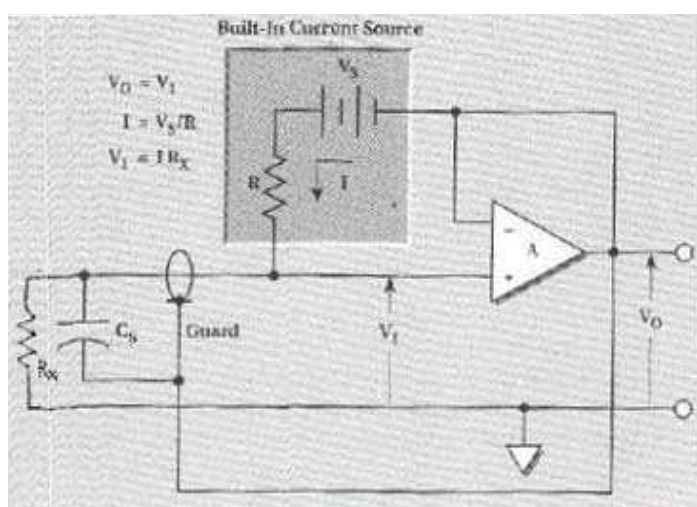
$$V_0 = V_1 = IR_X ; \quad I = V_S/R$$

**Rys. 12.** Omomierz z wbudowanym źródłem prądu.

Zaletą tej metody jest jej liniowość, szczególnie użyteczna w miernikach analogowych. Ponieważ prąd może być zmieniany stopniowo w kolejnych dekadach, zachodzi możliwość wyznaczenia charakterystyk  $I=f(V)$  półprzewodników.

Główną wadą jest to, że napięcie na mierzonym elemencie jest funkcją jego rezystancji, więc nie może być tak łatwo kontrolowane. Bardzo duże rezystancje mają często duży współczynnik napięciowy (*voltage coefficient*). Dlatego pomiary wykonane ze stałym źródłem napięciowym są bardziej sensowne. Dodatkowo odpowiedź układu przy pomiarze rezystancji większych niż  $10\text{G}\Omega$  będzie wolna. To ograniczenie może być jednak częściowo pokonane przez ochronę (*guarding*), jak to jest opisane poniżej.

#### 4.9.3 Omomierz pracujący w trybie „guarded ohms”



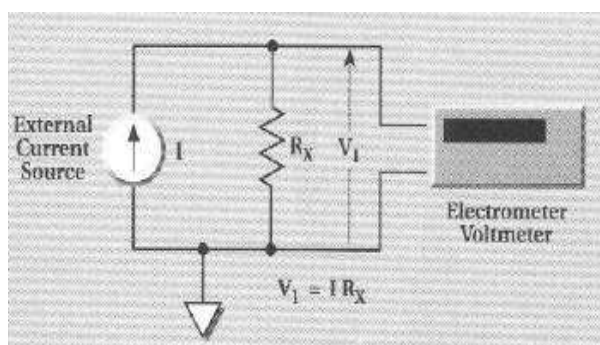
**Rys. 13.** Tryb ochronny.

Układ ten jest modyfikacją poprzedniego, w którym węzeł wysokiego potencjału jest osłaniany przez napięcie ochronne pobierane z wyjścia w.o. Ponieważ wzmacniacz ma wzmacnienie 1, to napięcie ochronne ma taki sam potencjał jak  $V_1$  i pojemność wejściowych przewodów jest znacząco neutralizowana. W rezultacie pomiary rezystancji większych niż  $10\text{G}\Omega$  są dużo szybsze.

Tryb ochronny (*guarded mode*) często znacząco redukuje rezystancje upływu przewodów wejściowych.

#### 4.9.4 Woltomierz z zewnętrznym źródłem prądu

W tej metodzie źródło prądu wymusza przepływ znanego prądu przez mierzoną rezystancję  $R_X$ , na której napięcie jest mierzone woltomierzem i na tej podstawie jest wyznaczana z prawa Ohma jej wartość.

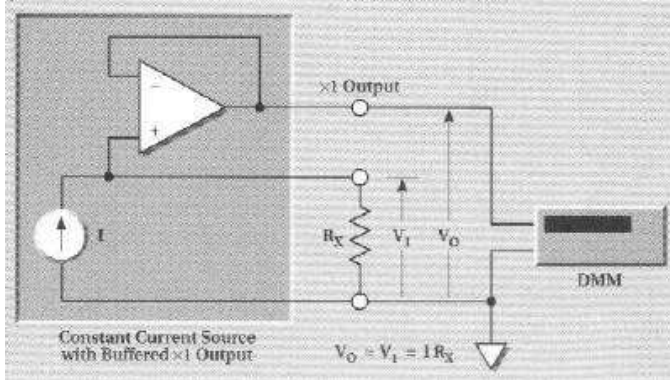


**Rys. 14.** Wykorzystanie do pomiaru

Gdy w miejsce woltomierza włączymy nanowoltomierz, układ taki będzie mógł służyć do pomiaru bardzo małych rezystancji ( $<\mu\Omega$ ). Wykorzystanie metody czteroprzewodowej eliminuje wpływ rezystancji przewodów na pomiar.

zewnętrznego źródła prądu.

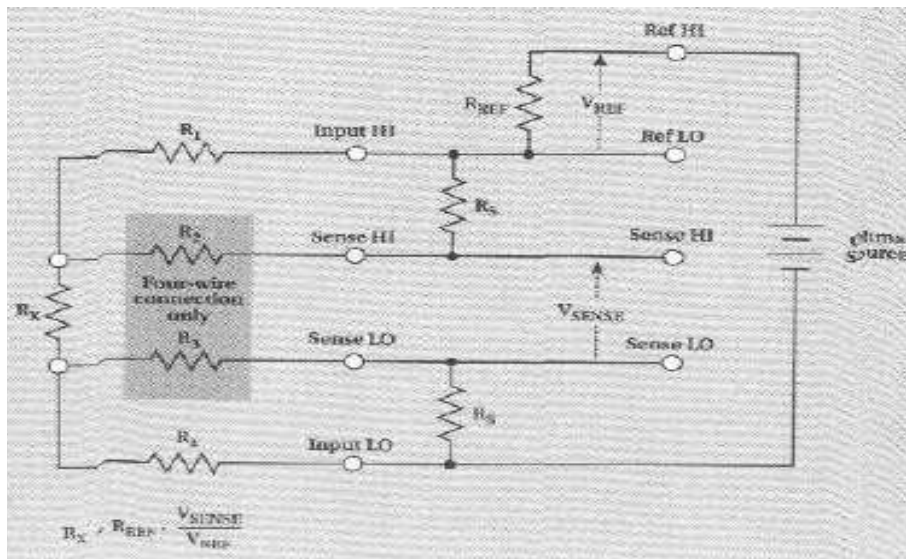
Dodatkowo źródło prądu, które może zmieniać polaryzację, może być wykorzystane do korekcji prądów niezrównoważenia. W tym celu trzeba wykonać dwa pomiary napięcia przy dwóch polaryzacjach źródła prądu, a wynik wyliczyć jako średnią tych pomiarów.



Rys. 15. Pomiar niskoimpedancyjnym woltomierzem typu DMM.

Jeśli źródło prądu ma wyjście buforowane wzmacniaczem operacyjnym o wzmacnieniu 1, wtedy do pomiaru napięcia możemy wykorzystać niskoimpedancyjny woltomierz typu DMM. To właśnie rozwiązanie jest przedstawione na schemacie obok.

#### 4.9.5 Omomierz DMM.



Rys. 16. Ilorazowa metoda pomiaru rezystancji.

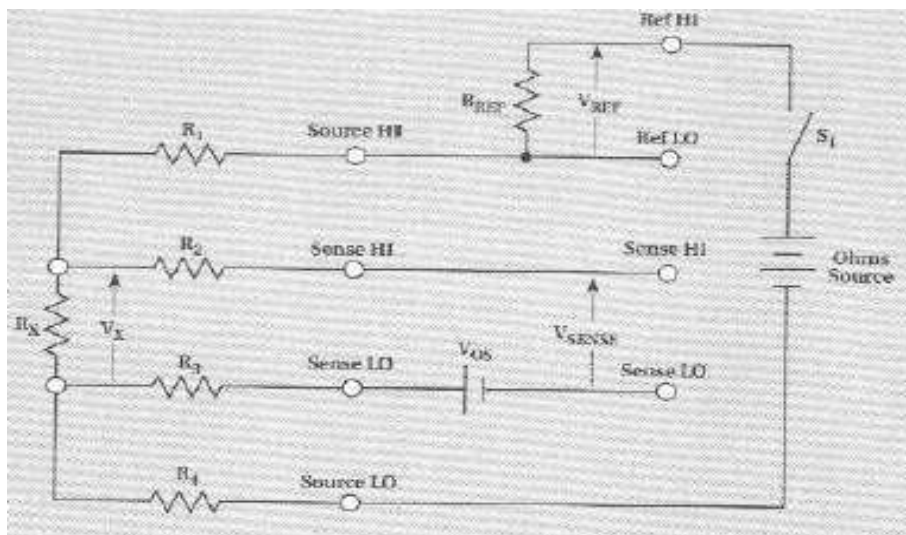
W typowym DMM-ie do pomiaru rezystancji wykorzystana jest metoda ilorazowa. Źródło napięcia wymusza przepływ tego samego prądu przez rezystor odniesienia  $R_{REF}$  i mierzoną rezystancję  $R_X$ . Mierząc napięcie na tych dwóch opornościach, możemy wyznaczyć szukaną wartość z następującej zależności przedstawionej poniżej.

$$R_X = R_{REF} \cdot \frac{SENSE\_HI - SENSE\_LO}{REF\_HI - REF\_LO}$$

Rezystory  $R_S$  wprowadzają automatycznie dwu- lub czteroprzewodowy pomiar rezystancji. Jeśli używana jest metoda dwuprzewodowa, pomiar będzie zawierał rezystancje przewodów reprezentowane przez  $R_1$  i  $R_4$ . Kiedy mierzona rezystancja jest mała, np. mniejsza

niż  $100\Omega$ , metoda czteroprzewodowa da znacznie lepszą dokładność. Rezystancje  $R_2$  i  $R_3$  nie powodują znaczącego błędu, ponieważ obwód dokonujący pomiaru (*sense circuit*), ma bardzo dużą impedancję.

#### 4.9.6 Mikroomierz



Rys. 17. Pomiar rezystancji mikroomierzem.

W tym urządzeniu także jest wykorzystana czteroprzewodowa ilorazowa metoda pomiaru rezystancji. Z racji tego, że nie ma tu rezystorów  $R_S$  jak poprzednio, aby uzyskać pomiar, wszystkie cztery przewody muszą być połączone.

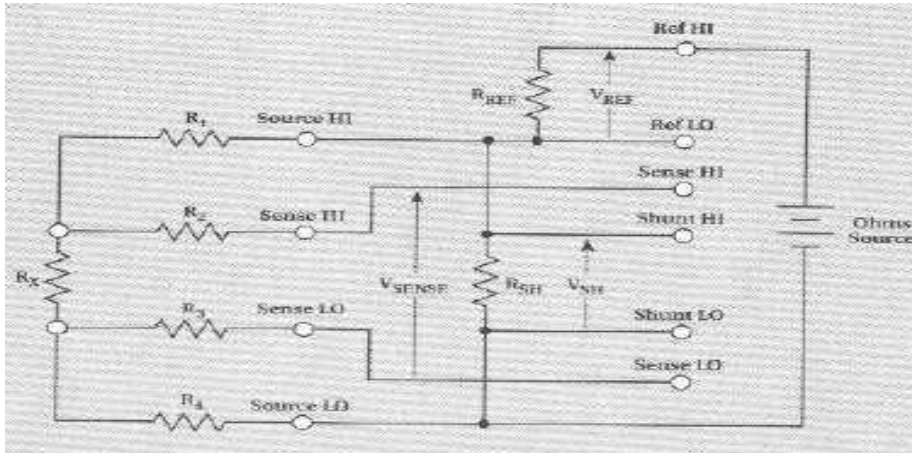
Jeśli w układzie występuje dodatkowo źródło napięcia  $V_{OS}$ , jak to ma miejsce na powyższym schemacie, to układ taki może pracować w trybie sterowania impulsowego (*pulsed drive*). Pozwala to na eliminację tzw. błądzących napięć niezrównoważenia (*stray offset voltages*). Dlatego należy wykonać dwa pomiary, jeden przy włączonym, drugi przy wyłączonym napięciu  $V_{OS}$ . Jakikolwiek napięcie przesunięcia pojawiające się przy wyłączonym  $V_{OS}$  będzie odjęte od napięcia zmierzonego przy  $V_{OS}$  włączonym. W ten sposób uzyskuje się większą dokładność pomiaru rezystancji, którą opisuje zależność:

$$R_X = R_{REF} \cdot \frac{V_{SENSE1} - V_{SENSE2}}{V_{REF}}$$

gdzie  $V_{SENSE1}$  jest mierzone przy zamkniętym  $S_1$  i wynosi  $V_X + V_{OS}$ , a  $V_{SENSE2}$  jest mierzone przy otwartym  $S_1$  i wynosi  $V_{OS}$ .

Na rysunku 18 przedstawiony jest schemat obwodu, realizującego pracę w trybie ochrony badanego urządzenia przed dużym napięciem (*dry circuit test mode*). Wstawiony jest tu dodatkowy rezystor  $R_{SH}$  ograniczający napięcie w otwartym obwodzie (*open-circuit voltage*) do wartości mniejszej niż 20mV. Zapobiega to uszkodzeniu warstwy izolacyjnej w testowanym urządzeniu i pozwala uzyskać dokładniejsze informacje o jego właściwościach przy pracy z małymi sygnałami. Teraz jednak trzeba jeszcze dokonywać dodatkowego pomiaru napięcia na tym rezystorze. Tak więc mierzoną rezystancję wyznaczamy z zależności:

$$R_X = R_{REF} \cdot \frac{V_{SENS}}{\frac{V_{REF}}{R_{REF}} - \frac{V_{SH}}{R_{SH}}}$$



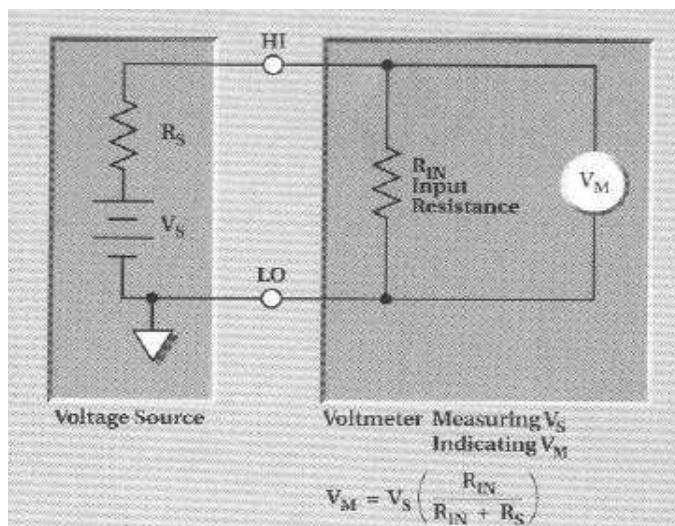
Rys. 18. Ochrona badanego urzadzania przed zbyt duzym napięciem.

## 5. Wysokoimpedancyjne pomiary napięcia

Pomiary ze źródeł napięcia o dużej impedancji wewnętrznej często są przyczyną powstawania błędów, takich jak np. błąd wynikający z obciążenia woltomierza rezystancją wejściową układu pomiarowego i wejściowym prądem niezrównoważenia lub zewnętrznymi, bocznikującymi rezystancjami i pojemnościami.

### 5.1 Błędy wynikające z obciążenia

#### 5.1.1 Obciążenie rezystancją wejściową ( $R_{IN}$ )



Rys. 19. Wpływ wejściowej rezystancji obciążenia na dokładność pomiaru napięcia.

Pomiary napięcia przy wysokiej impedancji są obarczone błędem wynikającym z impedancji wejściowej miernika oraz z impedancji podłączonego kabla. Rzeczywisty woltomierz może być przedstawiony jako układ idealnego woltomierza ( $V_M$  - z nieskończoną rezystancją wejściową) oraz wpiętego równolegle rezystora ( $R_{IN}$ ), reprezentującego rezystancję wejściową.

Jeżeli do wejścia miernika podłączymy źródło napięcia przedstawione jako szeregowe połączenie  $V_S$  oraz rezystancji  $R_S$ , to napięcie  $V_M$  pokazywane przez woltomierz zostanie zredukowane przez dzielnik napięciowy według wzoru:

$$V_M = \frac{V_S R_{IN}}{(R_{IN} + R_S)}$$

Na przykład, jeżeli założymy, że:

$R_S = 100\text{k}\Omega$ ,  $R_{IN} = 10\text{M}\Omega$ ,  $V_S = 5\text{V}$ , wtedy  $V_M = 4,96\text{V}$ .

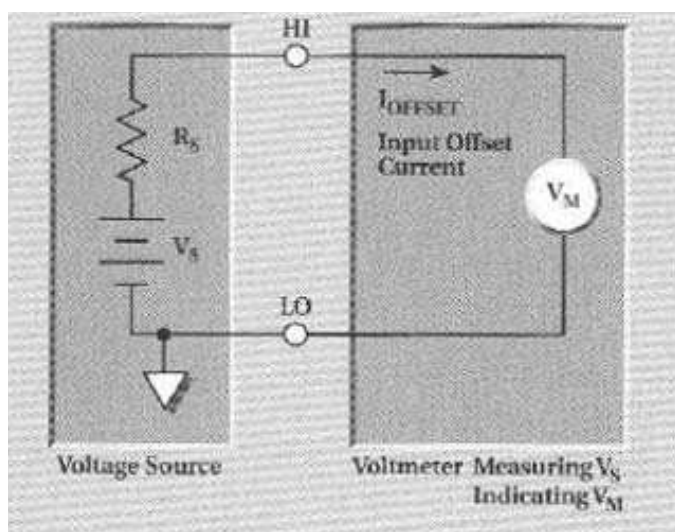
W tym przypadku rezystancja obciążenia powoduje powstanie błędu bezwzględnego wynoszącego 1%. Impedancja miernika powinna być dużo większa od impedancji źródła. Jeżeli na przykład wymagana jest dokładność na poziomie 1%, to impedancja miernika musi być 100 razy większa niż impedancja mierzonego źródła. Dla większych dokładności współczynnik ten powinien być odpowiednio większy.

Kabel łączący może wprowadzić znaczny błąd do pomiaru, ale tylko w przypadku, gdy impedancja źródła jest bardzo duża, rzędu  $10\text{G}\Omega$ .

### 5.1.2 Obciążenie wejściowym prądem niezrównoważenia ( $I_{OFFSET}$ )

Wejściowy prąd niezrównoważenia powoduje błędny odczyt napięcia na rezystancji  $R_S$  według zależności:

$$V_M = V_S \pm I_{OFFSET} R_S$$



**Rys. 20.** Wpływ wejściowego prądu niezrównoważenia na dokładność pomiaru napięcia.

Dla przykładu: zakładając następujące parametry:

$I_{OFFSET} = 1\text{pA}$

$R_S = 10\text{G}\Omega$

$V_S = 10\text{V}$

Otrzymujemy:

$V_M = 9,99\text{V}$  lub  $10,01\text{V}$  (w zależności od kierunku prądu niezrównoważenia).

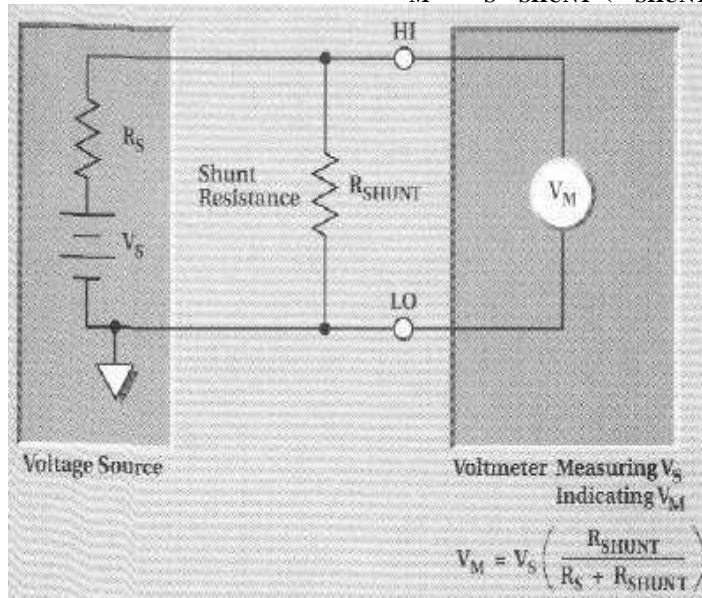
Prąd niezrównoważenia wprowadza więc błąd o wartości 0,1%.

W miernikach cyfrowych prąd niezrównoważenia utrzymuje się na poziomie od  $1\text{pA}$  do  $1\text{nA}$ , choć zwykle nie jest on uwzględniany w specyfikacjach. Elektrometry z kolei mają bardzo małe prądy wejściowe w granicach od  $10\text{fA}$  do  $50\text{aA}$ , jednakże zawsze są one podawane przez producenta.

### 5.1.3 Obciążenie rezystancją bocznikującą ( $R_{SHUNT}$ )

Każda zewnętrzna rezystancja bocznikująca wpływa na pomiar wartości napięcia źródła (rys.5). Podobnie jak w przypadku obciążenia rezystancją wejściową, rezystancja bocznikująca redukuje napięcie wskazywane przez woltomierz według zależności:

$$V_M = V_S R_{SHUNT} / (R_{SHUNT} + R_S).$$



Dla przykładowych parametrów:

$$R_S = 10G\Omega$$

$$R_{SHUNT} = 100G\Omega$$

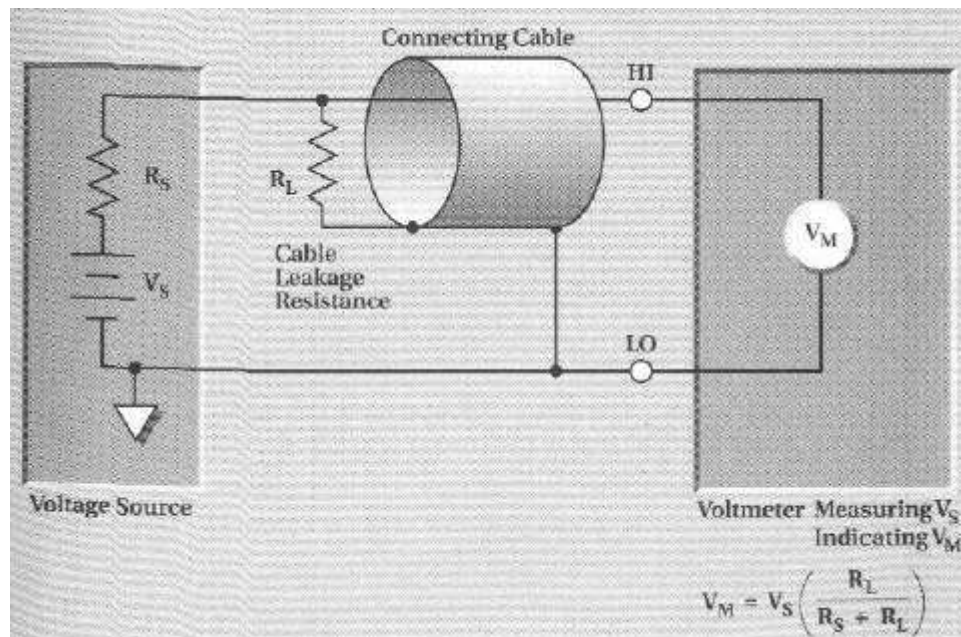
$$V_S = 10V,$$

napięcie zmierzone woltomierzem wyniesie:

$V_M = 9,09V$ , co daje błąd pomiaru o wartości 9%.

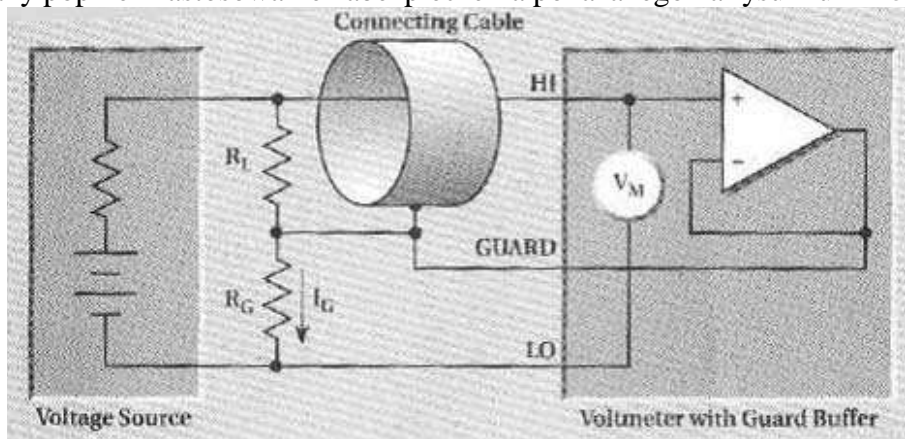
**Rys. 21.** Wpływ rezystancji bocznikującej na dokładność pomiaru napięcia.

Podstawową przyczyną powstawania rezystancji bocznikującej jest rezystancja upływu kabla. Sytuacja ta jest przedstawiona poniżej.



**Rys. 22.** Wpływ rezystancji bocznikującej na dokładność pomiaru.

Błąd spowodowany rezystancją upływu kabla może być w znacznym stopniu zredukowany poprzez zastosowanie zabezpieczenia pokazanego na rysunku nr 23.



Rys. 23. Konfiguracja 'guarded'.

Osłona kabla jest podłączona do wyjścia bufora zabezpieczającego zamiast do wejścia LO miernika. Ma to na celu wyrównanie potencjałów pomiędzy osłoną kabla i wejściem HI miernika. Prąd potrzebny do tego celu jest dostarczany z bufora zabezpieczającego.

Zabezpieczenie (*guard*) to z definicji punkt w obwodzie elektrycznym o małej impedancji, który ma potencjał zbliżony do potencjału terminalu wejściowego o wysokiej impedancji.

Dodatkową korzyścią z jego stosowania jest redukcja efektywnej pojemności kabla, co pozwala zwiększyć prędkość reakcji obwodu.

Wzmacniacz zabezpieczający ma bardzo dużą impedancję wejściową. Rezystancja upływu ( $R_L$ ) jest mnożona przez wzmocnienie wzmacniacza ( $A_{GUARD}$ ) zawierające się w przedziale:  $10^4 - 10^6$  i wpływa na mierzone napięcie według zależności:

$$V_M = V_S A_{GUARD} R_L / (A_{GUARD} R_L + R_S).$$

Na przykład dla danych:

$$R_S = 10G\Omega$$

$$R_L = 100G\Omega$$

$$V_S = 10V$$

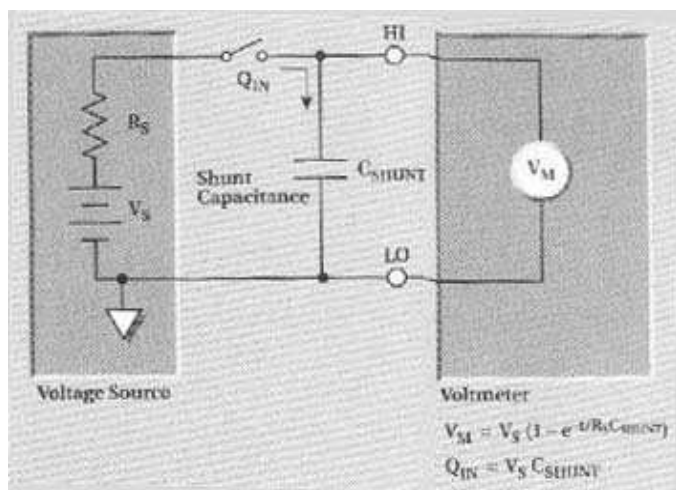
$$A_{GUARD} = 10^5,$$

napięcie zmierzone osiągnie wartość:

$V_M = 9,99999V$ . Błąd wynosi więc zaledwie 0,001%. Dla porównania – obwód bez zabezpieczenia z rezystorem bocznikującym odznaczał się błędem na poziomie 9%.

#### 5.1.4 Obciążenie pojemnością bocznikującą

Czas ustalania się mierzonej wartości zależy zarówno od rezystancji źródła jak i efektywnej pojemności na wejściu woltomierza. Na tą pojemność składają się połączone równolegle: pojemność wejściowa miernika i pojemność wejściowa kabla. Dla pomiarów wysokich rezystancji nawet mała wartość pojemności bocznikującej może zasadniczo wpłynąć na czasy ustalania. Przykładowo pojemność rzędu 100pF i rezystancja źródła wynosząca 20G $\Omega$ , skutkują czasem opóźnienia ( $RC$ ) równym 2 sekundy.



Rys. 24. Pojemność bocznikująca.

Na rysunku obok przedstawiony jest efekt obciążenia wejścia woltomierza o wysokiej impedancji poprzez pojemność bocznikującą. Dla warunku początkowego przełącznik jest rozwarty, a pojemność nie przechowuje ładunku. W momencie zamknięcia przełącznika napięcie ze źródła dostarczane jest do wejścia miernika.

Obecność pojemności powoduje, iż napięcie rośnie eksponentalnie według wzoru:

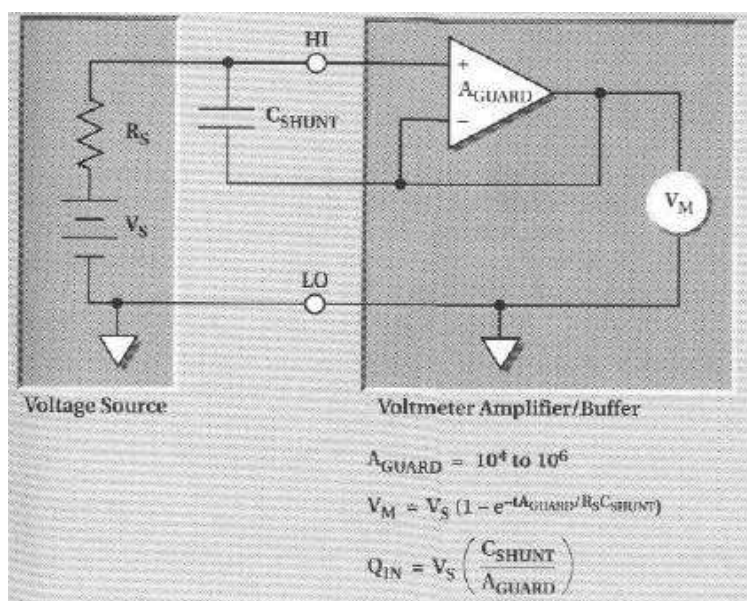
$$V_M = V_S(1 - \exp(t/R_S C_{SHUNT}))$$

i osiąga swą ostateczną wartość po pewnym czasie.

Po czasie  $\tau = RC$  napięcie osiąga 63% swojej ostatecznej wartości.

Poniższa tabela przedstawia zależność pomiędzy stałą czasową ( $\tau$ ) a procentową wartością mierzonego napięcia w odniesieniu do jego ostatecznej wartości:

Stała czasowa	Wartość procentowa
$\tau$	63%
$2 \tau$	86%
$3 \tau$	95%
$4 \tau$	98%
$5 \tau$	99,3%



Rys. 25. Pojemność bocznikująca (guarding).

Przykładowo dla  $R_S = 10G\Omega$  i  $C_{SHUNT} = 100pF$  stała czasowa wynosi 1 sekundę. Jednakże potrzeba aż 5 sekund, aby mierzone napięcie różniło się o mniej niż 1% od swej ostatecznej wartości.

Minimalizowanie wpływu pojemności bocznikującej odbywa się na identycznej zasadzie jak w przypadku rezystancji bocznikującej. Wzmacniacz napięciowy z otwartą pętlą znacząco zmniejsza czas ładowania pojemności.

Napięcie mierzone zmienia się w tym przypadku według zależności:

$$V_M = V_S(1 - \exp(-tA_{\text{GUARD}}/R_S C_{\text{SHUNT}})),$$

co skraca czas ustalania  $10^4 - 10^6$  razy (zależnie od wzmocnienia wzmacniacza).

## 5.2 Rezystancja izolacji

Elektrometry, takie jak np. woltomierze charakteryzują się bardzo dużą impedancją wejściową. Wysoka rezystywność izolacji jest sprawą kluczową przy przeprowadzaniu prawidłowych pomiarów, dlatego wiedza na temat materiałów, z których może być wykonany izolator ma istotne znaczenie. Rezystancja izolacji powinna być kilka rzędów wielkości większa niż rezystancja zastępcza układu wynikająca z twierdzenia Thevenina. W przeciwnym wypadku mierzona wartość napięcia zostanie zredukowana poprzez bocznikujące właściwości izolacji.

### 5.2.1 Wybór najlepszego izolatora

Kryteria wyboru:

- rezystywność skrośna: prąd upływu wprost przez materiał
- rezystywność powierzchniowa: upływ wzdłuż powierzchni zależny od poziomu jej zanieczyszczenia
- absorpcja: upływ zależny od ilości wody zaabsorbowanej przez izolator
- efekt piezoelektryczny: powstawanie ładunku pod wpływem naprężeń mechanicznych
- efekt triboelektryczny: wytwarzanie ładunków elektryczności statycznej poprzez tarcie
- absorpcja dielektryka: tendencja izolatora do gromadzenia lub uwalniania ładunków przez długi okres czasu

## **6. Pomiar prądu**

Do błędnego pomiaru małych prądów przyczyniają się:

- nieprawidłowe ekranowanie połączeń
- wejściowy prąd niezrównoważenia
- prąd upływu połączeń
- impedancja źródła
- prądy generowane na skutek efektu triboelektrycznego i piezoelektrycznego.

Prądy upływu są generowane poprzez wysokorezystywne ścieżki pomiędzy obwodem pomiarowym a pobliskim źródłem napięcia. Ich wpływ można znacznie ograniczyć poprzez stosowanie izolatorów wysokiej jakości (teflon, polietylen, szafir), redukcję wilgotności oraz przez wprowadzenie zabezpieczenia (*guarding*).

Impedancja źródła (rezystancja oraz pojemność) wpływa na poziom szumów przenoszonych na wyjście poprzez wzmacniacz operacyjny. Aby szумы na wyjściu były minimalne dąży się do maksymalnego zwiększenia rezystancji źródła przy jednoczesnym zmniejszeniu pojemności źródła.

Prąd niezrównoważenia ( $I_{\text{OFFSET}}$ ) jest obserwowany w momencie, gdy przy otwartych zaciskach amperomierz wskazuje jakąś wartość. Jego źródłem mogą także być efekty: triboelektryczny i piezoelektryczny. Zjawisko to można zminimalizować poprzez zastosowanie układu tłumienia prądu lub przez włączenie do układu miernika stabilnego

źródła prądu ( $I_{SUPPRESS}$ ), który będzie przeciwdziałał prądowi niezrównoważenia. Mierzona wartość prądu wynosi wtedy:

$$I_M = I_S + I_{OFFSET} - I_{SUPPRESS}.$$

### 6.1 Pomiar prądu za pomocą miernika ładunku

Dla pomiaru bardzo małych prądów rzędu femtoamperów, często lepiej jest użyć miernika ładunku mierzącego zmianę zgromadzonego ładunku w czasie. Ponieważ ładunek jest trudny do zmierzenia bezpośrednio, dlatego do podania jego wartości wykorzystuje się inne wielkości z nim związane. Najbardziej popularną metodą jest pomiar napięcia na kondensatorze o znanych parametrach. Ładunek wyraża się wtedy wzorem:

$$Q = CU$$

gdzie Q – ładunek zgromadzony na kondensatorze [C]

C – pojemność kondensatora [F]

U – napięcie na kondensatorze [V].

Prąd jest zdefiniowany jako zmiana ładunku w czasie dlatego jego wartość wynosi:

$$I = dQ/dt$$

Korzyści wynikające z zastosowania miernika ładunku do pomiaru małych prądów:

- znacznie mniejsze szумы – w układzie rezystor będący źródłem szumu zostaje zastąpiony bezszumnym kondensatorem.
- krótszy czas ustalania się wartości, który w przypadku pomiaru ładunku jest reprezentowany przez stałą czasową  $RC$ .
- szумы wynikające z wejściowej pojemności bocznikującej są minimalne.

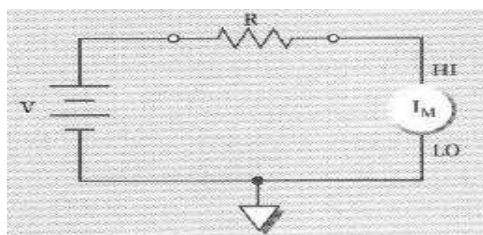
## 7. Pomiar dużej rezystancji

Przy pomiarze dużej rezystancji zwykle potrzebny jest elektrometr, który może dokonywać pomiaru dwoma sposobami: stałego napięcia (źródło napięcia i amperomierz) albo stałego prądu (źródło prądu i woltomierz). Czasami wyboru metody może dokonać użytkownik.

### 7.1 Metoda stałego napięcia

Ta metoda wymaga zastosowania źródła napięcia stałego oraz amperomierza lub pikoamperomierza. Niektóre urządzenia mają już wbudowane źródło napięcia i mogą automatycznie wyznaczyć rezystancje. Poniżej zostanie opisana ta metoda wraz ze sposobami redukcji rezystancji upływu spowodowanego urządzeniem pomiarowym.

#### *Podstawowa konfiguracja.*



**Rys. 26.** Metoda stałego napięcia.

Obok przedstawiony jest schemat podstawowy omawianej metody pomiarowej. Ponieważ spadek napięcia na amperomierzu jest pomijalnie mały, całe napięcie odkłada się na mierzonej rezystancji R, którą wyznaczamy z prawa Ohma  $R=V/I$ .

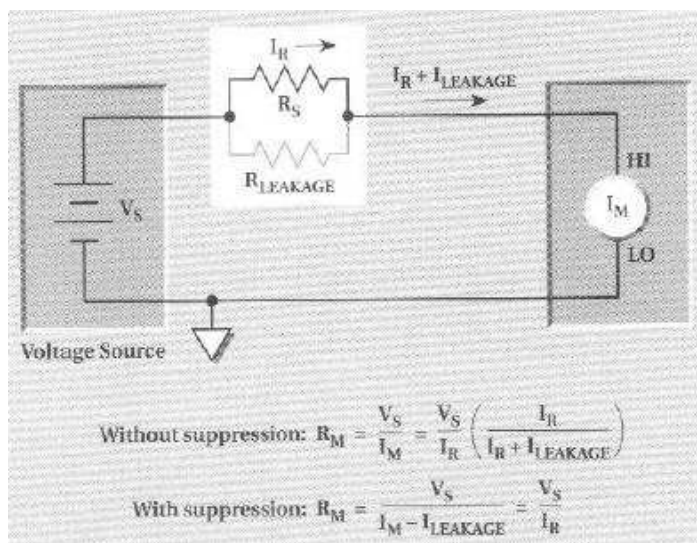
Ponieważ duże rezystancje są często funkcją przyłożonego do nich napięcia, proponowane jest porównanie wyników tej metody, z wynikami uzyskanymi za pomocą metody stałego prądu. Dokonując pomiaru dla kilku wartości źródła napięcia, można wyznaczyć krzywą zależności rezystancji od napięcia  $R=f(V)$ , a także współczynnik napięciowy rezystancji.

Niektóre aplikacje wykorzystujące tą metodę, zawierają następujące opcje: testowanie dwuterminalowych urządzeń wysokorezystancyjnych, pomiar rezystancji izolacji oraz wyznaczanie objętości i powierzchni rezystywnej materiałów izolacyjnych.

Opisywana metoda pomiarowa wymaga zastosowania pikoamperomierza, więc zachodzą tutaj zjawiska związane z pomiarem małych prądów. Jednym wspólnym źródłem błędów przy pomiarach dużych rezystancji jest „wyciek rezystancji” przez przewody i urządzenie pomiarowe. Są dwie metody do eliminacji tych błędów: *guarding* (omówiony nieco wcześniej w punkcie 4.9.3) i *baseline suppression*.

### 7.1.1 Baseline suppression.

Pomimo tego, że metoda stałego napięcia jest najodpowiedniejsza do pomiaru dużych rezystancji i jest dosyć szybka, należy powziąć pewne środki tłumiące prądy upływu w układzie. W przeciwnym wypadku prądy te będą się dodawały do mierzonego prądu, co zmniejszy dokładność pomiaru rezystancji. Wykorzystuje się do tego : *baseline suppression*. Jest to metoda, która eliminuje wpływ prądów upływu i w rezultacie otrzymujemy informacje o właściwym sygnale pomiarowym.



**Rys. 27.** Likwidacja prądu strat.

W tym obwodzie dokonujemy dwóch pomiarów prądu. Pierwszy z nich zachodzi przy usuniętej rezystancji mierzonej  $R_S$  i prąd strat  $I_{LEAKAGE}$  płynie wtedy tylko przez rezystancje strat  $R_{LEAKAGE}$ . Kolejny pomiar odbywa się przy włączonej rezystancji  $R_S$  przy płynącym prądzie  $I_M$ . Teraz szukaną wartość możemy wyznaczyć z następującej zależności:

$$R_S = \frac{V_S}{I_M - I_{LEAKAGE}}$$

Przykład:

$V_S=10V$ ,  $I_M=11pA$ ,  $I_{LEAKAGE}=1pA$ .

Bez eliminacji błędu rezystancja wynosi  $909 G\Omega$ , przy eliminacji jej wartość wynosi  $1T\Omega$ .

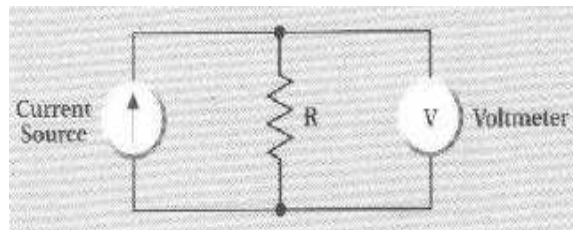
Tak więc w tym przypadku dokładność pomiaru została zwiększona o 9%.

### 7.2 Metoda stałego prądu

Pomiar przy wykorzystaniu tej metody może być osiągnięty przez użycie woltomierza wraz ze źródłem prądu lub tylko omomierza. W pierwszym przypadku zachodzi możliwość realizacji czteroprzewodowej metody pomiaru oraz kontroli wartości prądu płynącego przez

mierzony element. Omomierz zaś dokonuje pomiaru metodą dwuprzewodową, a wartość prądu płynącego przez mierzony element zależy od użytego zakresu pomiarowego.

### 7.3 Użycie woltomierza i zewnętrznego źródła prądu



*Rys. 28. Metoda pomiaru stałym prądem.*

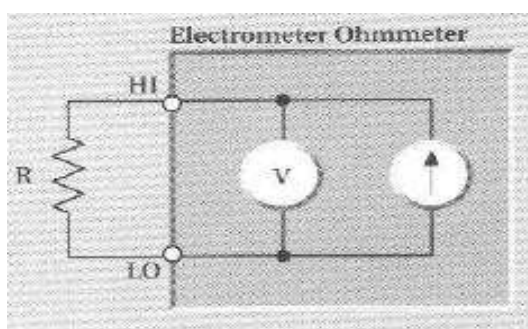
Używając tej metody, można mierzyć rezystancje o wartościach nawet  $10^{14}\Omega$ . Mimo tego, że jest to dosyć prosta metoda, należy powziąć pewne środki ostrożności, aby pomiar był jak najdokładniejszy.

Impedancja wejściowa woltomierza musi być co najmniej 100 razy większa niż mierzona rezystancja. Typowo wynosi ona około  $10^{14}\Omega$ . Także wyjściowa impedancja źródła prądu musi być dużo większa niż rezystancja mierzona, aby pomiar był liniowy. W tej metodzie pomiarowej trudno jest wyznaczyć współczynnik napięciowy mierzonej rezystancji, gdyż napięcie mierzone na niej, zależy od jej wartości. Jeśli ten współczynnik odgrywa istotną rolę, lepiej zastosować wtedy pomiar stałym napięciem.

Woltomierza z zewnętrznym źródłem prądu w omawianej konfiguracji używa się przy wyznaczaniu wysokich rezystywności za pomocą sondy czteroostrzowej lub korzystając z metody Van der Pauwa. Sytuacja taka ma miejsce szczególnie przy badaniach materiałów półprzewodnikowych.

### 7.4 Użycie omomierza

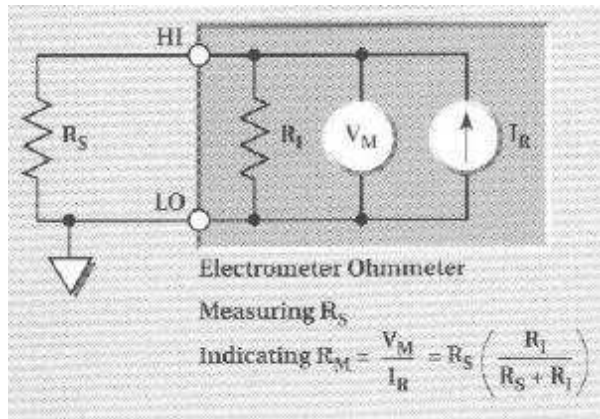
Na dokładność pomiaru wykonanego omomierzem ma wpływ wiele czynników. Poniżej zostaną omówione najważniejsze z nich.



*Rys. 29. Wykorzystanie omomierza.*

Omomierz dokonuje dwuprzewodowego pomiaru rezystancji wykorzystując wbudowane źródło prądu i woltomierz, które są już odpowiednio połączone. Następnie automatycznie przelicza i wyświetla mierzoną wartość.

## 7.5 Obciążenie miernika



Rys. 30. Wpływ obciążenia na dokładność pomiaru.

Schemat ten przedstawia obciążenie omomierza dużą rezystancją. W tym przypadku źródło prądowe w omomierzu wytwarza prąd odniesienia  $I_R$  i jest połączone równolegle z woltmierzem  $V_M$  o skończonej wejściowej rezystancji  $R_I$ . Taki układ omomierza jest podłączony do mierzonej rezystancji  $R_S$ , i wskazywana przez miernik wartość  $R_M$  wynosi:

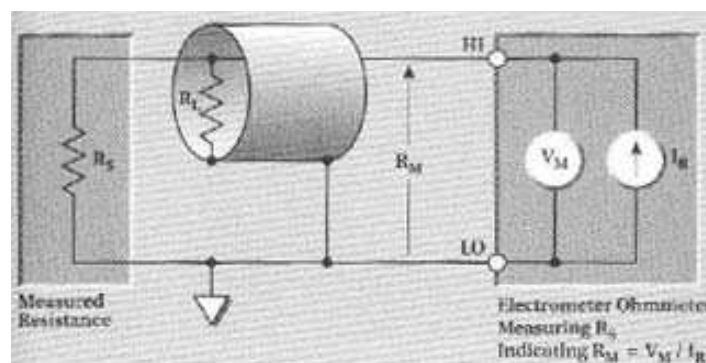
$$R_M = \frac{V_M}{I_R} = R_S \cdot \left( \frac{R_I}{R_S + R_I} \right)$$

Przykładowo, jeśli  $R_I = 1\text{T}\Omega$ , a  $R_S = 1\text{G}\Omega$  to wskazana wartość wyniesie  $R_M = 0,999\text{G}\Omega$ . Tak więc w tym przypadku błąd wynosi zaledwie 0,1% i jest bardzo mały w odniesieniu do pozostałych czynników wprowadzających niepewność pomiaru tak dużych rezystancji. Dla porównania, wykonując pomiaru tej samej rezystancji za pomocą DMM, błąd wyniósłby 50%. Z tego też względu należy pamiętać, aby rezystancja wejściowa miernika była dużo większa od mierzonej. Maksymalne obciążenie dla omomierza można wyznaczyć z powyższego wzoru, zakładając żadaną dokładność pomiaru.

## 7.6 Guarding

Również w przypadku omawianych pomiarów zachodzi potrzeba eliminacji rezystancji upływu. Znaczące efekty otrzymuje się wykorzystując tzw. *guarding*.

Rozważmy sytuację, gdy pomiar jest wykonywany bez ochrony styków, jak to jest przedstawione na poniższym schemacie.



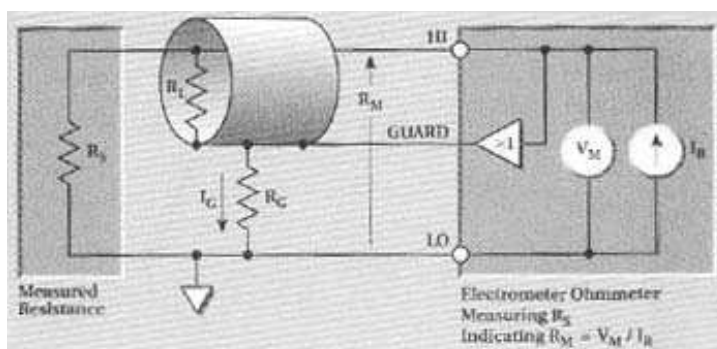
Rys. 31. Wpływ rezystancji przewodów przy pomiarach dużych rezystancji.

W układzie tym omomierz wymusza przepływ prądu  $I_R$  przez mierzoną rezystancję  $R_S$  i mierzy napięcie  $V_M$  na zaciskach HI LO. Jeśli przyjmiemy, że miernik ma skończoną wartość rezystancji wejściowej, mierzoną rezystancję wyznaczamy z prawa Ohma:  $R_M = V_M / I_R$

Ponieważ rezystancja stratności przewodów  $R_L$  jest włączona równolegle do  $R_S$ , faktycznie mierzona wartość rezystancji  $R_M$  wynosi:

$$R_M = R_S \cdot \left( \frac{R_L}{R_S + R_L} \right)$$

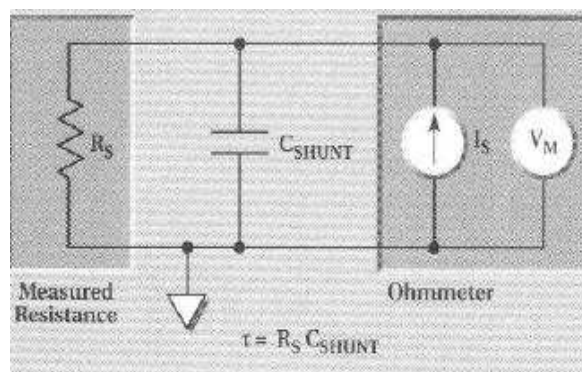
Efekt obciążania miernika rezystancją stratności przewodów (lub innymi stratnymi rezystancjami) może być rzeczywiście wyeliminowany poprzez podanie na osłonę, która ekranuje przewód, napięcia z wyjścia wzmacniacza o wzmacnieniu 1. Omawiany przypadek jest przedstawiony na rysunku poniżej.



Rys. 32. Osłona przewodów eliminująca rezystancje upływu.

Dzięki takiej operacji, napięcie na rezystancji  $R_L$  wynosi zero, a zatem cały prąd testowy  $I_R$  płynie przez badaną rezystancję  $R_S$ , która teraz może być dokładnie wyznaczona. Prąd  $I_G$  płynący przez rezystancję  $R_G$  do masy może być znaczny, ale pochodzi on z niskoimpedancyjnego wyjścia wzmacniacza i nie ma wpływu na pomiar.

### 7.7 Czas ustalania



Rys. 33. Stała czasowa układu wynikająca z pojemności pasożytniczej.

Czas ustalania sygnału w obwodzie jest szczególnie ważny przy pomiarach dużych rezystancji. Jak to jest pokazane na schemacie, pasożytnicza pojemność bocznikująca  $C_{SHUNT}$  musi być naładowana do mierzonego napięcia prądem  $I_S$ . Okres, w którym to się odbywa, determinuje stała czasowa  $\tau = R_S C_{SHUNT}$ . Aby dokładność pomiaru była odpowiednio wysoka, okres ten musi być cztery, pięć razy większy niż stała czasowa.

Dlatego często przy pomiarach bardzo dużych rezystancji wynosi on kilka minut i silnie zależy od pojemności  $C_{SHUNT}$ . Z tego powodu należy dążyć do minimalizowania tej pojemności przez używanie jak najkrótszych przewodów łączących. Dobre efekty daje też wykorzystanie *guardingu*. Generalnie lepsze efekty czasowe daje metoda pomiaru za pomocą źródła napięcia i amperomierza.

## **7.8 Charakterystyka rezystorów o bardzo dużych wartościach.**

Rezystory o wartościach powyżej  $1\text{G}\Omega$  często są określane mianem rezystorów wysokoomowych (*high-megohm*). Ze względu na ich duży opór są to dość nietypowe urządzenia i w związku z tym przy ich pomiarach należy brać pod uwagę szereg czynników, takich jak: napięciowy i temperaturowy współczynnik, efekty mechanicznych uderzeń oraz zanieczyszczenia.

Generalnie stosuje się dwa typy wysokoomowych rezystorów: złożone z warstw węglowych (*carbon-film*) oraz z tlenku metalu (*metal-oxide*). Pomimo tego, że są też dostępne inne rodzaje tych elementów, doświadczenie pokazuje że te dwa są najbardziej użyteczne. W porównaniu do konwencjonalnych rezystorów, wysokoomowe rezystory węglowe są: wysokoszumowe (*noisy*), niestabilne, mają duży współczynnik napięciowy i temperaturowy oraz są bardzo kruche. Dlatego lepszych parametrów poszukiwano rozwijając technologie tlenku metalu, czego efektem jest zmniejszenie obu współczynników i polepszenie czasowej stabilności tych rezystorów. Nowoczesne elementy tego typu posiadają współczynnik napięciowy mniejszy niż  $5\text{ppm/V}$  i po pięciu latach testów nie wykazują znaczącego dryfu wartości. Temperaturowe współczynniki [TWR] są rzędu:  $0,01\%/^{\circ}\text{C}$  dla  $100\text{M}\Omega$ ,  $0,025\%$  dla  $100\text{G}\Omega$ .

Tak delikatne urządzenia wymagają bardzo delikatnego obchodzenia się z nimi. Mechaniczne uderzenia mogą znacznie zmienić ich rezystancję przez wyrwanie części przewodzącego materiału. Nie powinno się też dotykać części przewodzących i szklanej powłoki ochronnej, gdyż mogą powstać wtedy nowe ścieżki prądowe lub małe prądy wygenerowane elektrochemicznie.

Rezystory są powleczone powłoką ochronną, aby zapobiec formowaniu się na nich warstw wodnych. Dlatego jeśli zachodzi podejrzenie, że na ich powierzchni powstały jakieś zanieczyszczenia, należy je wyczyścić metanolem. Po tej operacji, elementy powinny być suszone przez kilka godzin w środowisku o małej wilgotności, aby statyczne ładunki elektryczne zgromadzone na nich mogły się rozproszyć.

## **8. Pomiary ładunku**

Ładunek jest całką po czasie z prądu i zwykle nie jest mierzony na ciągłym podłożu (*continuous basis*). Często może być pożądane, aby mierzyć ładunek pewnej ilości cząstek, zgromadzony na jakiejś powierzchni lub na elemencie takim jak kondensator. Gdy elektrometr może dokonać takich pomiarów, mogą mieć na niego wpływ pewne źródła błędów i ograniczeń, które zostaną omówione poniżej.

### **8.1 Źródła błędów**

Na dokładność mierników dokonujących pomiaru ładunku mogą wpływać następujące czynniki: wejściowy prąd niezrównoważenia, obciążenie napięciowe, generowane prądy i niska impedancja źródła.

### **8.2 Wejściowy prąd niezrównoważenia**

Wartość tego prądu w elektrometrach jest bardzo mała, jednak przy pomiarze małych ładunków może ona wprowadzać znaczący błąd. Po długim okresie czasu urządzenie pomiarowe będzie całkowało ten prąd niezrównoważenia, co uwidoczni się w pomiarze jako

długoterminowy dryf ładunku. Typowa wartość tego prądu wynosi 4fA, co będzie powodowało zmianę mierzonego ładunku o 4fC na sekundę. Jeśli wartość prądu niezrównoważenia jest znana, to zachodzi możliwość kompensacji tego błędu przez odjęcie dryfu ładunku od odczytywanej aktualnie wartości.

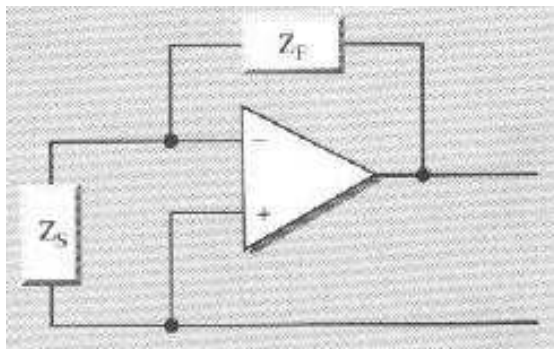
### **8.3 Obciążenie napięciowe (Voltage Burden)**

Obciążenie to w mierniku ładunku ze sprzężeniem zwrotnym jest generalnie małe (<100μV), podobnie jak to jest w amperomierzu ze sprzężeniem zwrotnym. Jednakże kiedy chwilowa wartość prądu skoczy powyżej 10μA, obciążenie napięciowe może przekroczyć momentalnie tę wartość. W warunkach przeciążenia może ono osiągnąć wiele woltów, w zależności od wartości wejściowej.

Jeśli źródło mierzonego ładunku wytwarza napięcie przynajmniej 10mV w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, to typowy miernik ładunku sfałszuje prąd poprawnie. Jeśli napięcie to jest dużo mniejsze, to wpływ szumów na wejściu może stać się tak duży, że po wzmacnieniu uniemożliwią one dokonanie pomiaru.

### **8.4 Generowane prądy**

Prądy wygenerowane w przewodach wejściowych lub wyindukowane na skutek niewystarczającej osłony, mogą spowodować błędy w pomiarach ładunków, szczególnie jeśli wartość ładunku nie przekracza 100pC.



**Rys.34.** Podłączenie elementu badanego do miernika.

Wielkość impedancji źródła może mieć wpływ na parametry szumowe miernika ładunku ze sprzężeniem zwrotnym. Na schemacie przedstawiony jest sposób podłączenia źródła pomiaru do miernika. W mierniku ładunku impedancję w gałęzi sprzężenia zwrotnego stanowi kondensator. Na podstawie tego schematu wzmacnienie szumu może być wyznaczone na podstawie poniższej zależności

$$\text{Szum wyjściowy} = \text{Szum wejściowy} * (1 + Z_F/Z_S)$$

Gdzie:  $Z_S$  – impedancja źródła,  $Z_F$  – impedancja w gałęzi sprzężenia zwrotnego;

Generalnie rzecz biorąc, jeśli rośnie  $Z_F$ , to wzmacnienie szumowe także rośnie. Wyznaczając odpowiednią wielkość  $Z_F$  należy posłużyć się podręcznikiem lub specyfikacją wykorzystywanego miernika ładunku.

### **8.5 Kontrola zera**

W przeciwieństwie do pomiarów napięcia, pomiary ładunku są destruktywne. Oznacza to, że podczas pomiaru ładunek jest usuwany z badanego urządzenia. Jeśli mierzymy ładunek zebrany np. w kondensatorze, należy pamiętać, aby wyłączyć kontrolę zera w

mierniku zanim podłączymy badany kondensator. W przeciwnym wypadku część ładunku rozładuje się przez impedancje obwodu kontroli zera i nie zostanie zmierzona przez miernik.

Wyłączenie tej kontroli spowoduje nagłą zmianę w odczycie ładunku, określaną mianem „skoku zera” (*zero hop*). Aby wyeliminować efekt tego skoku, należy dokonać odczytu zaraz po odłączeniu obwodu kontroli zera, a potem odejmować tę wartość od wszystkich dokonanych pomiarów. Najprostszym sposobem na to jest uaktywnienie w mierniku funkcji *REL* albo *SUPPRESS* gdy kontrola zera jest wyłączona, co wyzeruje odczyt spowodowany skokiem.

## **9. Podsumowanie**

### **9.1 Połączenia**

Podstawowym założeniem przy wykonywaniu poprawnych pomiarów jest odpowiednie połączenie miernika z urządzeniem, które jest przedmiotem pomiarów (*DUT – Device Under Test*). Aby połączenie było prawidłowe należy zawsze podłączać zacisk miernika o największej wartości rezystancji do punktu o najwyższej rezystancji w układzie *DUT*.

Należy również zwrócić uwagę na zastosowane przewody łączące, gdyż od ich parametrów również zależy dokładność pomiaru. W niektórych przypadkach mogą odgrywać one równie istotną rolę jak sam przyrząd pomiarowy. Dlatego też przeważnie używa się przewodów współosiowych lub triaksowych. W przewodach współosiowych przewodnik otoczony jest warstwą izolacji, a następnie powłoką ekranującą. Wszystko to zamknięte jest w płaszczu ochronnym. Lepsze parametry osiąga się jednak stosując przewody triaksowe, które posiadają dodatkową wewnętrzną powłokę izolującą i ekranującą. Umożliwia to podłączenie tego wewnętrznego ekranu do zacisku „guard”. O tym jakie wynikają z tego zalety, zostało opisane wcześniej w punkcie 7.6. Dodatkowo charakteryzują się one mniejszym szumem i większą odpornością na mechaniczne działania.

Należy pamiętać też o tym, że każdy metr przewodu, to jest pewna rezystancja, pojemność i prądy upływu. Dlatego trzeba zawsze dbać o to, aby maksymalnie skrócić długość używanych przewodów.

Również istotną rolę mogą odgrywać złącza wykorzystywane w obwodzie. Przeważnie używa się złącza BNC ( dla przewodów współosiowych) lub złącza triaksowego. Różnica między nimi jest taka, jak i między samymi przewodami. W obu przypadkach centralny przewodnik złącza dołączany jest do potencjału HI, a zewnętrzna osłona do LO. Z uwagi na bardziej precyzyjne przeznaczenie, w złączu triaksowym wykorzystuje się kontakty ze złota.

### **9.2 Interferencja i ekranowanie**

Interferencja zachodzi, kiedy obiekt naładowany elektrycznie znajdzie się w pobliżu obiektu nie naładowanego. Przy układach nisko impedancyjnych zjawisko to nie występuje, ponieważ ładunek bardzo szybko rozprasza się. Przy układach o wysokiej impedancji rezystancja zatrzymuje ładunek. Pomiar może być więc przekłamaný poprzez obecność pola elektromagnetycznego. Efekt ten można zminimalizować poprzez ekranowanie. Najprostszym ekranem jest szczelne, metalowe pudełko podłączane do zacisku GUARD miernika.

### 9.3 Wpływ otoczenia na pomiary

#### 9.3.1 Temperatura i jej stabilność

Zmienna temperatura może wpłynąć na wynik pomiarów na kilka sposobów. Przede wszystkim izolatory pod wpływem zmiennej temperatury kurczą się bądź rozszerzają wpływając na wzrost prądu szumów. Generalnie prąd upływu bramki tranzystora JFET podwaja się przy wzroście temperatury o 10°C. Dla optymalnego pomiaru należy go przeprowadzać w otoczeniu stabilnym termicznie. Przed pomiarem cały system pomiarowy musi osiągnąć stabilność temperaturową.

#### 9.3.2 Wilgotność

Wzrost wilgotności może przyczynić się do zmniejszenia rezystancji izolacji, co ma bardzo duże znaczenie w przypadku pomiarów wysokoimpedancyjnych. Ponadto wilgotność w połączeniu z różnymi zanieczyszczeniami powoduje powstawanie prądu niezrównoważenia (efekty elektrochemiczne). Aby zminimalizować ten efekt należy wszystkie komponenty oraz połączenia systemu pomiarowego dokładnie oczyścić używając odpowiedniego rozpuszczalnika, a następnie pozostawić do wyschnięcia na parę godzin przed dokonaniem pomiaru.

### 9.4 Zależności czasowe

Jeżeli mierzony sygnał DC posiada składową zmienną AC to wskazanie miernika będzie „podążać” za sygnałem zmiennym. Wraz ze wzrostem częstotliwości składowej AC, szybkość odpowiedzi miernika DC maleje, aż do momentu, gdy przy pewnej częstotliwości ( $f_{3dB}$ ) tylko średnie wartości napięcia wejściowego będą wskazywane przez miernik. Pasma częstotliwościowe mierników cyfrowych wynosi połowę wartości częstotliwości przetwarzania sygnału. Wejście analogowe ma znacznie szersze pasmo.

Pasmo określa zdolność danego urządzenia do odpowiedzi na sygnał zmienny w czasie przy określonym zakresie częstotliwości.

Należy również prześledzić zdolność miernika do odpowiedzi na sygnał o kształcie impulsu. Czas narastania jest zdefiniowany jako czas, jaki upływa między momentem, w którym sygnał osiąga 10% swojej wartości do momentu gdy osiągnie 90%. Czas narastania wpływa na jakość pomiaru, jeżeli jego wartość jest porównywalna z czasem wykonywania pomiaru (błąd = 10%). Wydłużenie czasu pomiaru dwukrotnie powoduje redukcję błędu do wartości 1%, a trzykrotne wydłużenie wpływa na zmniejszenie błędu do wartości 0,1%.