

Laboratorium Podstaw Pomiarów

Dokumentowanie wyników pomiarów – protokół pomiarowy

Instrukcja

Opracował:

dr hab. inż. Grzegorz Pankanin, prof. uczelni



Instytut Systemów Elektronicznych
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechnika Warszawska

Warszawa 2022

v. 4.2
(16.09.2022)



Dokumentowanie wyników pomiarów – protokół pomiarowy

Podstawową formą dokumentowania wyników pomiarów jest protokół pomiarowy. Powinien on zawierać wszystkie informacje niezbędne do odtworzenia pomiaru, tzn. ponownego jego wykonania w tych samych warunkach tj. z wykorzystaniem tych samych przyrządów pomiarowych, wybranych zakresów itp.

Protokół musi zawierać też dane identyfikujące osobę (osoby) wykonującą pomiary, a także miejsce i datę wykonanego doświadczenia.

W przypadku protokołu z badań w ramach laboratorium studenckiego konieczne jest też podanie danych osoby prowadzącej ćwiczenie, a dobrym zwyczajem akademickim jest podawanie stopni i tytułów naukowych.

Jako tytuł dokumentu należy podać numer i tytuł ćwiczenia.

Cel ćwiczenia należy sformułować w sposób ogólny w co najwyżej dwóch zdaniach.

Schemat układu pomiarowego odwzorowuje konfigurację obwodu pomiarowego. Zazwyczaj w protokole zamieszczamy schemat ideowy; w uzasadnionych przypadkach schemat blokowy. Każdy element schematu powinien być oznaczony odpowiednim symbolem.

Wykaz aparatury stanowi swojego rodzaju opis schematu układu pomiarowego. Należy w nim odwoływać się do oznaczeń na schemacie, podać nazwę, typ przyrządu i co najwyżej jeden dominujący parametr (np. klasę w przypadku miernika magnetoelektrycznego). Nie należy natomiast w tym miejscu przytaczać wzorów na niepewność itp. Konieczne jest podanie numeru ewidencyjnego przyrządu.

W **opisie procedury pomiarowej** należy zamieścić informacje na temat sposobu przeprowadzanego doświadczenia – tylko w takim zakresie, który nie wynika z lektury pozostałych części protokołu (np. ustawioną wartość napięcia na wyjściu zasilacza, wartość ograniczenia prądowego, częstotliwość pomiarową itp.). Należy unikać opisów czynności standardowych, które domyślnie muszą być wykonane podczas pomiarów (np. połączyłem układ pomiarowy, włączyłem napięcie zasilające itp.).

Wyniki pomiarów zazwyczaj przedstawiamy w **formie tabelarycznej**. Wyjątek stanowią jednokrotne pomiary, np. pomiar minimalnego czy maksymalnego napięcia zasilacza.

W nagłówku tabeli używamy symboli wielkości fizycznych i symboli jednostek im przypisanych. Stosownie do sytuacji należy stosować podwielokrotności (piko-, nano-, mili-) bądź wielokrotności (kilo-, mega-) używanych jednostek. W przypadku oznaczeń wielkości nie zaznaczonych na schemacie oraz oznaczeń niestandardowych należy obok tabeli zamieścić stosowne objaśnienie. Należy unikać słownych opisów w tabelach.

W pierwszych kolumnach tabeli zamieszczamy wyniki pomiarów bezpośrednich i ustawienia (np. wartości rezystancji opornika dekadowego), a w kolejnych – wyniki obliczeń.



Wyniki pomiarów bezpośrednich zapisujemy z **precyzją**, jaką zapewniają przyrządy pomiarowe, podobnie nastawy elementów regulowanych np. oporników dekadowych.

Uwaga 1: Wyniki zapisujemy w jednostkach, w jakich wskazują przyrządy. Nie zamieniamy mV na V, lecz w przypadku, gdy przyjętą w tabeli jednostką jest V, po liczbie dodajemy literę m.

Uwaga 2: W przypadku wskazań, w których ostatnia cyfra na wyświetlaczu przyrządu cyfrowego jest zerem, zapis ma uwzględniać to zero. Tak samo w przypadku przyrządów analogowych – operujemy zawsze odczytem z precyzją trzech cyfr, nawet gdy ostatnia cyfra jest zerem.

Precyzja wartości obliczonych zależy od precyzji wyników pomiarów wielkości, które są wykorzystywane do obliczeń. Zasada jest następująca: precyzja wartości obliczonej jest nie lepsza niż najgorsza precyzja spośród wartości zmierzonych wykorzystywanych do obliczeń.

Przykład

Wyznaczono metodą pośrednią wartość rezystancji opornika poprzez pomiar prądu i napięcia. Wykorzystano prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I}$$

Napięcie zmierzono woltomierzem cyfrowym z wyświetlaczem 4½-cyfrowym, co dało precyzję czterech cyfr (w szczególnym przypadku może to być pięć cyfr, jeśli najbardziej znaczącą cyfrą jest 1), a prąd zmierzono przyrządem analogowym – zapewnia on precyzję odczytu trzech cyfr. Stąd precyzja obliczonej wartości rezystancji jest trzycyfrowa (dotyczy to całego wyniku niezależnie od położenia przecinka).

Uwaga 3: Podając wyniki obliczeń stosujemy podwielokrotności i wielokrotności: piko, nano, mikro, mili, kilo, mega itd. Unikamy zapisów 10^n . Przy zapisie należy uwzględnić **uwagę 1**.

Precyzja wyznaczenia niepewności też jest w metrologii ściśle określona. Końcowy wynik obliczenia niepewności należy podawać z precyzją dwóch cyfr, jeśli pierwszą cyfrą znaczącą jest 1 oraz z precyzją jednej cyfry, jeśli pierwsza cyfra jest większa niż 1. **Końcowe wartości niepewności zawsze zaokrąglamy „w górę”.**

Przykład

Jeżeli obliczona wartość niepewności rozszerzonej bezwzględnej pomiaru prądu wynosi $U(I) = 0,01163 \text{ mA}$, to wynik zaokrąglamy do wartości $U(I) = 0,012 \text{ mA}$. Natomiast, jeśli z obliczeń uzyskamy $U(I) = 0,02116 \text{ mA}$, to wynik zaokrąglamy do wartości $U(I) = 0,03 \text{ mA}$. Te same reguły stosujemy przy wyznaczaniu niepewności względnych.



Często obliczona wartość niepewności używana jest w dalszych obliczeniach – np. do obliczania niepewności rozszerzonej lub do wyznaczania niepewności w pomiarach pośrednich. Bezwarunkowe stosowanie przedstawionej zasady w wielu przypadkach mogłoby doprowadzić do znacznego przeszacowania niepewności pomiaru. Dlatego też przy przedstawianiu wartości niepewności standardowej lub niepewności cząstkowych w pomiarze pośrednim stosujemy precyzję zwiększoną do **dwóch cyfr znaczących**, a dopiero wartość końcową przedstawiamy z precyzją jednej cyfry (bądź dwóch cyfr, gdy pierwszą cyfrą znaczącą jest 1) – zaokrągloną w górę.

Przykład

Rezystancję zmierzono metodą pośrednią poprzez pomiar napięcia i prądu. Niepewność standardowa względna wyznaczenia rezystancji wyraża się zależnością

$$u_{rel}(R) = \sqrt{u_{rel}^2(U) + u_{rel}^2(I)}$$

Wyniki obliczeń niepewności standardowej względnej napięcia i prądu podajemy z precyzją zwiększoną do dwóch cyfr znaczących

$$u_{rel}(U) = 0,12\% \quad i \quad u_{rel}(I) = 2,1\%$$

skąd otrzymujemy

$$u_{rel}(R) = \sqrt{(0,12\%)^2 + (2,1\%)^2} = 2,103\% \approx 2,1\%$$

Wartość niepewności standardowej podajemy z precyzją zwiększoną do dwóch cyfr znaczących, gdyż często na jej podstawie obliczana jest niepewność rozszerzona. Np. dla współczynnika rozszerzenia $k = 3$

$$U_{rel}(R) = 3 \cdot u_{rel}(R) = 6,3\%$$

Jeżeli obliczona powyżej niepewność rozszerzona jest końcowym wynikiem obliczeń, to jej wartość podajemy z precyzją jednej cyfry (gdyż pierwsza cyfra znacząca jest większa od 1), zaokrąglając wynik w górę, co w efekcie daje

$$U_{rel}(R) = 7\%$$

Uwaga 4: W przypadku wartości niepewności znacznie mniejszych od 1, zaleca się stosować zapis 10^{-n} zamiast wielu zer po przecinku. Nigdy nie piszemy, że niepewność jest równa zero.

W punkcie protokołu **Wzory i obliczenia** zamieszczamy wszystkie wzory wykorzystywane do obliczeń oraz przykładowe obliczenia (podstawienie do wzorów). Należy pamiętać o precyzji przedstawiania wyniku oraz o jednostkach.

Wyniki nieraz należy przedstawić w formie graficznej, czyli w postaci **wykresu**. Wykres powinien mieć osie oznaczone symbolem wielkości i symbolem jednostek. Powinny one być wyskalowane. Każdy wynik pomiaru (na podstawie tabeli pomiarowej) powinien być



wyraźnie zaznaczony symbolem **x** lub **o**. Na podstawie naniesionych punktów rysuje się zwykle linię obrazującą przebieg badanej zależności, prowadzącą między pierwszym i ostatnim punktem pomiarowym. Przedłużanie linii wykresu poza ten obszar jest dopuszczalne tylko w przypadku, gdy wynika to ze stosowanej metody pomiarowej (np. w przypadku ekstrapolacji liniowej). W Laboratorium Podstaw Pomiarów dopuszczalne jest tworzenie wykresów punktowych. Osoby lepiej znające MsExcel mogą wykorzystać opcję „Dodaj linię trendu” w celu zobrazowania przebiegu zmienności badanych wielkości.

Czasami istnieje konieczność zamieszczenia w protokole **oscylogramów**. W Laboratorium można je uzyskać w formie elektronicznej, korzystając z aplikacji dostępnej na komputerze. W przypadku pomiarów pewnych wielkości w oparciu o oscylogram (np. przy wyznaczaniu okresu sygnału), należy na rysunku zaznaczyć mierzone odcinki, a wyniki pomiarów ich długości, wartości stałych oscyloskopu i odpowiednie obliczenia zamieścić w protokole. W przypadku pomiarów automatycznych wyniki znajdujące się na oscylogramie należy przepisać do protokołu. W używanych w Laboratorium oscyloskopach niektóre jednostki wyświetlane są skrótowo (np. dla stałej C_x : *ms* zamiast *ms/dz*). W protokole należy je uzupełnić do poprawnej postaci.

Wnioski powinny zawierać merytoryczną analizę uzyskanych wyników – porównanie ich z wartościami nominalnymi, czy też porównanie wyników tej samej wielkości uzyskanych za pomocą różnych metod pomiarowych. W tym celu można korzystać z aplikacji **Porównywanie wyników**, dostępnej na pulpicie komputera. Uzyskany za pomocą tej aplikacji wykres należy skopiować (używając prawego przycisku myszki), zamieścić w protokole i skomentować. Wartościowa jest też analiza dokładności i przedyskutowanie sposobów jej poprawienia. Niedopuszczalne są stwierdzenia typu: „Wyniki są zgodne z oczekiwaniami” itp.

W celu porównania uzyskanych wyników z wartościami teoretycznymi można skorzystać z **programów demonstracyjnych**, dostępnych na pulpicie komputera. Pojedynczy wykres można skopiować przy użyciu prawego przycisku myszki, natomiast całe okno aplikacji – za pomocą kombinacji klawiszy → **Alt Print_Screen**.

* * *

Każdy wynik pomiaru obarczony jest **niepewnością**. W Laboratorium Podstaw Pomiarów będziemy obliczali **niepewność standardową** $u(x)$ mierzonej wielkości x lub **niepewność standardową względną** $u_{rel}(x)$ wyrażoną wzorem

$$u_{rel}(x) = \frac{u(x)}{x} \cdot 100\%$$

Niepewność standardowa wyrażona jest w jednostkach mierzonej wielkości. Niepewność względną będziemy zawsze wyrażać w procentach (%). Korzystając z arkusza kalkulacyjnego **MsExcel** należy symbol % traktować jak jednostkę, wpisując go w nagłówku tabeli i pomijając we wzorach obliczeniowych i wartościach wpisanych w komórkach arkusza.



W sytuacjach mogących budzić wątpliwości określenie *niepewność standardowa* uzupełniane jest przymiotnikiem *bezwzględna*. Należy jednak pamiętać, że samo określenie *niepewność standardowa* oznacza – podobnie jak symbol $u(x)$ bez indeksu – niepewność standardową bezwzględną.

Niepewność standardowa określa przedział, w którym z prawdopodobieństwem ok. 68% zawiera się wartość rzeczywista mierzonej wielkości. W celu oszacowania maksymalnej szerokości przedziału niepewności (np. przy ocenie zgodności wyników uzyskanych różnymi metodami) oblicza się tzw. **niepewność rozszerzoną**. W Laboratorium Podstaw Pomiarów nie będziemy tego robić. Aplikacja służąca do porównywania wyników niepewność rozszerzoną oblicza automatycznie.

Pojedynczy wynik pomiaru należy zapisać w postaci

$$\text{oznaczenie wielkości} = \text{wynik} \pm \text{niepewność standardowa bezwzględna} \quad \text{jednostka}$$

Przykładowy pojedynczy wynik pomiaru prądu zapiszemy w postaci

$$I = 124,83 \pm 0,18 \text{ mA}$$

W przypadku większej liczby pomiarów wyniki zamieszczamy w tabeli – w osobnej kolumnie wyniki i w osobnej wartości niepewności standardowej lub niepewności standardowej względnej (zależnie od polecenia w instrukcji do ćwiczenia).

Dla większości przyrządów pomiarowych używanych w Laboratorium Podstaw Pomiarów niepewność można wyznaczyć, korzystając ze wzorów podanych w instrukcjach obsługi. Na stanowisku pomiarowym udostępnione są tabele, zawierające wyrażenia na największy dopuszczalny błąd względny $\delta_g x$ pomiaru napięcia, prądu i rezystancji. Aby na podstawie tego parametru oszacować niepewność standardową, należy znać rozkład prawdopodobieństwa, jakiemu podlegają wyniki pomiaru danej wielkości. Przyjmuje się, że wyniki otrzymywane z przyrządów analogowych lub cyfrowych podlegają rozkładowi jednostajnemu. W takiej sytuacji we wzorach na niepewność standardową pojawia się współczynnik $\sqrt{3}$. Niepewność standardową bezwzględną będziemy obliczać ze wzoru

$$u(x) = \frac{\Delta_g x}{\sqrt{3}} = \frac{x \cdot \delta_g x}{\sqrt{3} \cdot 100\%} \quad (1-1)$$

natomiast niepewność standardową względną – ze wzoru

$$u_{rel}(x) = \frac{u(x)}{x} \cdot 100\% = \frac{\delta_g x}{\sqrt{3}} \quad (1-2)$$

gdzie x oznacza mierzoną wielkość (odpowiednio napięcie U , prąd I , rezystancję R).



W przypadku **przyrządów analogowych** niepewność określana jest na podstawie parametru zwanego **klasą**. Np. dla woltomierza magnetoelektrycznego **LM-3** największy dopuszczalny błąd bezwzględny pomiaru napięcia U wyraża się wzorem

$$\Delta_{kl}U = \frac{kl \cdot U_z}{100} \quad (1-3)$$

gdzie kl oznacza klasę woltomierza (np. 0,1; 0,2; 0,5; 1), a U_z – zakres pomiarowy.

W ogólnym przypadku przy szacowaniu niepewności pomiaru uwzględnia się również **zdolność rozdzielczą** przyrządu (np. 0,5 lub 0,2 elementarnej działki). W Laboratorium Podstaw Pomiarów ten składnik będziemy pomijali. Przy takim uproszczeniu niepewność standardowa pomiaru napięcia woltomierzem magnetoelektrycznym wyraża się wzorem

$$u(U) = \frac{\Delta_{kl}U}{\sqrt{3}} \quad (1-4)$$

a niepewność standardowa względna – wzorem

$$u_{rel}(U) = \frac{\Delta_{kl}U}{U \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad (1-5)$$

W przypadku **elementów wzorcowych** (np. opornik dekadowy) największy dopuszczalny błąd pomiaru podawany jest w postaci **tolerancji** lub **klasy** (nie mylić z klasą przyrządu pomiarowego). Oba te parametry oznaczają największy dopuszczalny błąd względny pomiaru $\delta_g R$ wyrażony w procentach. Na podstawie badań statystycznych można stwierdzić, że wartości wzorców charakteryzują się rozkładem normalnym (Gaussa) wokół wartości nominalnej. Dlatego ich niepewność standardowa obliczana jest ze wzoru, w którym w mianowniku występuje liczba 3 zamiast $\sqrt{3}$

$$u(R) = \frac{R \cdot \delta_g R}{3 \cdot 100\%} \quad (1-6)$$

Podobnie niepewność standardowa względna obliczana jest ze wzoru

$$u_{rel}(R) = \frac{\delta_g R}{3} \quad (1-7)$$

W **pomiarach pośrednich** wynik końcowy obliczany jest ze wzoru opisującego wpływ różnych wielkości (w tym wyników pomiarów bezpośrednich)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-8)$$

W celu obliczenia **niepewności standardowej złożonej** wyniku y w ogólnym przypadku trzeba wyznaczyć pochodne cząstkowe $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ dla każdej składowej x_i

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n)} \quad (1-9)$$



Istnieją jednak zależności, dla których wzór na niepewność standardową złożoną znacznie się upraszcza.

Dla funkcji zawierających tylko sumy i/lub różnice wielkości wpływających niepewność standardową bezwzględną wyniku w pomiarze pośrednim można obliczyć jako pierwiastek z sumy kwadratów poszczególnych niepewności standardowych bezwzględnych. Np. dla funkcji

$$y = x_1 + x_2 - x_3 \quad (1-10)$$

niepewność standardowa bezwzględna jest równa

$$u(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3)} \quad (1-11)$$

Natomiast dla funkcji zawierających jedynie iloczyny i/lub ilorazy wielkości wpływających analogiczna zależność obowiązuje dla niepewności standardowych względnych, np. gdy

$$y = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3} \quad (1-12)$$

to

$$u_{rel}(y) = \sqrt{u_{rel}^2(x_1) + u_{rel}^2(x_2) + u_{rel}^2(x_3)} \quad (1-13)$$

* * *

Do porównywania wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarów można stosować aplikację **Porównywanie wyników**, dostępną na komputerach w Laboratorium. W odpowiednie pola należy wpisać porównywane wyniki oraz ich niepewności standardowe bezwzględne lub względne, a następnie dla każdego z nich wybrać **współczynnik rozszerzenia**. Domyślną wartością jest 3, można jednak zróżnicować ten parametr w zależności od sposobu uzyskania danego wyniku:

- $\sqrt{3}$ – dla pomiarów bezpośrednich,
- $\sqrt{6}$ – dla pomiaru tej samej wielkości wykonanego dwukrotnie,
- 3 – w pozostałych przypadkach.