

BŁĘDY I POPRAWKI NARZĘDZI MIERNICZYCH

NAPISAŁ:

ZDZISŁAW RAUSZER

inżynier-technolog, doktor nauk technicznych h. c.

Dyrektor Głównego Urzędu Miar

Wydanie drugie
niezmienione

Jednym ze źródeł wielu nieporozumień i bałamuctw¹⁾ w metrologii są pojęcia poprawek i błędów narzędzi mierniczych (n. Instrumentfehler), a właściwie to ostatnie pojęcie. Wydaje się, że źródło tych nieporozumień leży w niedostatecznie ścisłym określeniu pojęcia błędu oraz w niezbyt dogodnej i właściwej terminologii. Niniejszy artykuł ma na celu wyjaśnienie tych pojęć.

Określenia wstępne.

Przez wyraz miara rozumiem wyłącznie wynik pomiaru, wyrażony iloczynem jednostki miar przez liczbę, — nigdy zaś narzędzie miernicze.

Wzorcem miary nazywam ciało fizyczne, którego pewna własność pod względem wielkości przedstawia²⁾ tę miarę z określoną dokładnością³⁾ 4). Niektóre z wzorców najczęściej używanych mają nazwy szczególne, a więc wzorzec długości nazywamy przymiarem, wzorzec masy — odważnikiem, wzorzec oporu elektrycznego — opornikiem, wklęsły wzorzec objętości — pojemnikiem. Wzorce bywają jednomiarowe, jak np. przymiar bruskowy (płytkowy) Johansson'a, zwyczajny pojemnik brzegowy, albo wielomiarowe, jak przymiar kreskowy, np. metrowy podzielony kreskami na milimetry, menzura, biureta itp.

Przyrządem mierniczym nazywamy każdy mechanizm, służący do pośredniego lub bezpośredniego dokonywania pomiarów³⁾.

Wzorce miar i przyrządy miernicze stanowią razem narzędzia miernicze³⁾.

¹⁾ ...ein Begriff, der in der Metronomie zeitweise recht arge Verwirrungen hervorgerufen hat. Scheel. Metronomie. Brunshwik, 1911, pag. 26.

²⁾ Wielkość, którą wzorzec ma przedstawiać, jest jego wielkością mierniczą, w odróżnieniu od innych, które mu są również właściwe (wysokość odważnika, długość od końca do końca przymiaru kreskowego).

³⁾ Rauszer Z. Projekt ustawy o miarach. Warszawa, 1918, pag. 15. Określenia te weszły do polskiego prawa o miarach.

⁴⁾ Wyrazu wzorzec używa się w nauce także w znaczeniu inkorporacji miary, wykonanej z wysoką dokładnością i służącej wyłącznie do porównywania z nią wzorców używanych bezpośrednio do mierzenia. Nazwa „przyrząd wzorcowy” (zam. normalny) jest nielogiczna.

Podziałką nazywam szereg wskaźników (kresiek, punktów, sztyftów, ostrzy, otworków itp.), ograniczających miary wywzorcowane na narzędziu mierniczym. Odległość (lub łuk na podziałkach kołowych) między dwoma wskaźnikami nazywa się działką. Odległość między dwoma sąsiednimi wskaźnikami jest działką elementarną (działką najniższego rzędu).

Wskazanie nominalne. Wskazanie poprawne.

Część istotna procesu mierzenia polega normalnie na zauważeniu zbiegania się (koincydencji) dwóch wskaźników. Jeden z tych wskaźników jest związany z rzeczą mierzoną, drugi jest od rzeczy mierzonej niezależny, najczęściej nieruchomy. Jeden z tych wskaźników zwykle (metody nie zerowe) należy do szeregu podobnych, które razem tworzą podziałkę; każda działka tej podziałki odpowiada mierze określonej, albo takiej, którą określić możemy.

Mierzę np. przymiarem rysunkowym odległość dwóch punktów wykreślnych *A* i *B*. Ustawiłem więc przymiar rysunkowy tak, aby obydwie punkty znajdowały się przy jego krawędzi, a przy tym jeden z nich, np. *A*, wypadł także na prostej wyznaczonej przez kreskę zerową przymiaru. Wówczas punkt *B* jest wskaźnikiem związanym z rzeczą mierzoną. Jeżeli punkt *B* znajduje się na przedłużeniu którejkolwiek kreski przymiaru, to kreska ta jest owym drugim wskaźnikiem, z którym pierwszy wskaźnik, tj. punkt *B*, zbiega się. Gdy punkt nie trafia na żadną z kresiek, a więc jest punktem wewnętrznym jednej z działek elementarnych, i gdy nie zadowala nas przyjęcie kreski najbliższej do punktu za zbiegającą się z nim, to wówczas odległość punktu *B* od początkowej kreski tej działki elementarnej, do której punkt *B* należy, porównujemy na oko z tą działką. Możemy przyjąć w tym przypadku, że zespół owych dwóch sąsiednich kresiek stanowi ów wskaźnik nieruchomy, związany z narzędziem mierniczym⁵⁾. Gdy przymiarem będziemy mierzyli np. szerokość stołu, to krawędź stołu będzie wskaźnikiem, związanym z długością mierzoną.

Tak samo w menzurze (cylindrze mierniczym) wskaźnikiem, związanym z objętością mierzoną, jest najniższy punkt menisku, wskaźnikiem od niej niezależnym — kreska podziałki; w termometrze wskaźnikiem, związanym z temperaturą, jest

⁵⁾ Albo że wskaźnik nieruchomy jest wskaźnikiem fikcyjnym, związanym niezmiennie ze wskaźnikami, między którymi się znajduje.

pozioma styczna do swobodnej powierzchni rtęci; w zegarze, manometrze, amperometrze wskaźnikiem, związanym z rzeczą mierzoną, jest wskazówka, a wskaźnikiem od niej niezależnym — odpowiednia kreska podziałki lub dwie sąsiednie kreski. W pojemniku brzegowym (jednomiarowym) wskaźnikiem, związanym z objętością cieczy, jest jej zwierciadło, wskaźnikiem od niej niezależnym — płaszczyzna brzegu pojemnika.

Pewne określone położenie tych dwóch wskaźników-protagonistów względem siebie nawzajem wyznacza miarę. W najogólniejszym przypadku, tj. wtedy, kiedy zerowy stan wielkości nie odpowiada zeru podziałki, następuje to przez dwie kolejne koincydencje dwóch par wskaźników-protagonistów, z których jedna odpowiada zerowemu stanowi wielkości mierzonej, a druga temu stanowi (ilości), który zmierzyć pragniemy. Te dwie koincydencje wyznaczają na podziałce pewną działkę (długość lub kąt); znając ją, już bez trudności poznamy miarę, której ona odpowiada. Jeżeli w danym pomiarze zero podziałki odpowiada zerowej ilości, tak jak to było w poprzednich przykładach, to sprawa upraszcza się i do wyznaczenia działki potrzebna jest jedna tylko koincydencja, a więc jedna obserwacja. Przykład tego mamy zwykle we wszystkich przyrządach wskazówkowych, należycie wyregulowanych, w termometrach, pojemnikach itd.

Zależność między wielkością mierniczą wzorca albo działką narzędzia mierniczego i miarą, która jej odpowiada, poznaje się według oznaczenia miary na narzędziu mierniczym albo według innych powiadomień, takiemu oznaczeniu równoważnych. Więc np. na termometrze mamy następujące oznaczenia miary: ponad podziałką literę C i przy odpowiednich kreskach liczby 0, 10, 20, . . . itd. Te oznaczenia wystarczają zupełnie, aby każdej działce móc przypisać właściwą jej miarę, np. — 18 C, + 45 C (oznaczenie domyślne). Może na narzędziu nie być żadnych oznaczeń, byleby tylko skądinąd było wiadome (zwyczaj, świadectwo sprawdzenia itp.), czemu odpowiada określona działka, jaką miarę wyraża pewna jego własność itp. Np. na prototypach państwowych kilograma nie ma żadnego oznaczenia miary, a jednak nikt zainteresowany nie ma wątpliwości, że prototyp taki nie tylko jest wzorcem kilograma, lecz nawet jednym z najważniejszych dokumentów, dających możliwość określić tę wielkość, którą nazywamy kilogramem.

Uświadomienie tej liczby, którą określa wspomniana wyżej koincydencja wskaźników-protagonistów przy czynności mierzenia, nazywa się odczytaniem wskazania narzę-

dzia mierniczego. Liczba ta jest albo bezpośrednio poszukiwaną miarą, albo przynajmniej daje możliwość znalezienia jej.

Oznaczenia, które są podane na narzędziu mierniczym, lub równoważne tym oznaczeniom powiadomienia, nazywamy *oznaczeniami nominalnymi*. Wskazania, tj. miary narzędzia mierniczego, odczytane wyłącznie na podstawie tych oznaczeń nominalnych, są *wskazaniami nominalnymi* albo, co oznacza to samo, miarami nominalnymi rzeczy mierzonej⁶⁾. Wskazanie nominalne będziemy oznaczali przez I_n (*indicatio nominalis*).

We wszystkich przytoczonych przykładach proces mierzenia w istocie swej jest analogiczny. Wszędzie znajdujemy wskaźnik od czynnika mierzonego niezależny: kreska przymiaru, brzeg pojemnika, kreska menzury, zegara, areometru, skali galwanometru i wskaźnik zbiegający się z tym pierwszym — od czynnika mierzonego zależny: punkt ograniczający odcinek, krawędź stołu, zwierciadło płynu, wskazówka — wszystkie zmieniające swe położenie razem ze zmianą wzajemnych odległości punktów, albo krawędzi stołów, objętości cieczy, temperatury, natężenia prądu itd. We wszystkich tych przypadkach na podstawie oznaczeń mierniczych na narzędziach odczytujemy wreszcie w analogiczny sposób wskazanie nominalne, czyli miarę czynnika mierzonego⁷⁾.

⁶⁾ Wskazanie nominalne narzędzia mierniczego jest funkcją wyłącznie jego oznaczeń lub równorzędnych powiadomień, które pozwalają każdemu wskaźnikowi podziałki przypisać pewną określoną miarę. Wskazanie jest więc tylko liczbą. Długość np. przymiaru, za pomocą którego uzyskano wskazanie, nie ma tu żadnego wpływu: gdyby z tą samą długością było skojarzone inne oznaczenie — mielibyśmy inne wskazanie. Wskazanie jest to oznaczenie, które odczytujemy dla poznania miary rzeczy mierzonej. Jeżeli więc narzędzie jest jednomiarowe (sprawdzian trzpieniowy, pojemnik zwyczajny, ogranicznik prądu el.), to zawsze można zastąpić wyrażenie wskazanie przez *oznaczenie*. W ogóle zaś, mając na uwadze to, co było mówione o oznaczeniu domyślnym, można powiedzieć, że *wskazanie jest oznaczeniem, wyróżnionym przez wskaźnik, związany z rzeczą mierzoną, spośród ogółu (jawnych i domyślnych) oznaczeń narzędzia mierniczego*.

⁷⁾ W ogóle związek między koincydencją wskaźników-protagonistów, a wskazaniem narzędzi mierniczych ustala się na podstawie teorii danego przyrządu mierniczego. Np. w zwyczajnej prostej wadze równoramiennej wskaźnikiem zależnym od rzeczy mierzonej jest wskazówka osadzona na belce, wskaźnikiem niezależnym jest płaszczyzna jarzma wagi. Wskazanie wagi ma miejsce przy koincydencji tych wskaźników (waga znajduje się w wyznaczonym położeniu równowagi) i równe jest sumie wskazań odważników, które się znajdują wtedy na szalce odważnikowej. Związek między czynnikiem mierzonym a wskaźnikiem od tegoż czynnika zależnym bynajmniej nie musi mieć charakteru mechanicznego, jak w powyżej przytoczonych przykładach; wystarcza, jeżeli związek ten

Krótko mówiąc, wskazanie nominalne narzędzia mierniczego jest wynikiem pomiaru, odczytanego na tym narzędziu w takich warunkach, w których ono jest przeznaczone do pomiarów⁸⁾.

Jeżeli dokładność narzędzia mierniczego nie zadowala nas, sprawdzamy wskazania tego narzędzia, co uskuteczniamy np. przemierzając narzędziem bardziej dokładnym albo metodą dokładniejszą wielkość, już odmierzoną narzędziem sprawdzanym. Tak postępujemy z areometrem, termometrem, wzorcem objętości, licznikiem energii elektrycznej. Porównywanie przymiarów drutowych na komparatorze geodezyjnym jest typowym przykładem czynności tego rodzaju: odmierzamy przymiarem normalnym długość między skrajnymi mikroskopami komparatora, a następnie porównujemy tę długość z długością przymiarów drutowych. To jest zasada komparacji. Reszta czynności — to są szczegóły techniczne lub zabiegi, mające na celu eliminację błędów. Rzadko możemy bardziej bezpośrednio porównać ze sobą dwa wzorce, jak to np. ma miejsce przy porównaniu mas dwóch odważników metodą Gauss'a, albo kiedy sprawdzamy suwak mierniczy przymiarami płytkowymi Johansson'a.

Tą czy inną drogą postępując, otrzymujemy dla każdego wskazania nominalnego narzędzia sprawdzanego odpowiadające mu wskazanie narzędzia bardziej dokładnego. Jest to wskazanie poprawne (mesure correcte, Istwert, Messwert, Istmass). Wskazanie poprawne, odpowiadające wskazaniu nominalnemu I_n , będziemy oznaczali przez I_c (indicatio correctae).

Wskazania, które nazwałem poprawnymi, często bywają nazywane wskazaniami rzeczywistymi. Oczywiście

w jakikolwiek sposób daje się urzeczywistnić, choćby niezależnie od czynnika mierzonego. W przyrządzie stroboskopowym do pomiaru szybkości kątowej wskaźnikiem związanym z czynnikiem mierzonym jest wskazówka, której wychylenia są funkcją szybkości tarczy stroboskopowej, lecz z zasady mierniczej przyrzędu wynika, że związek między szybkością mierzoną a wskazówką istnieje tylko wtedy, gdy ruch obrotowy przedmiotu, poprzez tarczę stroboskopową obserwowanego, pozornie ustaje. Podobnie w pirometrze optycznym syst. Holborn'a - Kurlbaum'a wskaźnikiem związanym z temperaturą mierzoną jest wskazówka amperomierza (wywzorcowanego zwykle w stopniach temperatury), lecz związek ten w myśl teorii tego przyrzędu istnieje tylko wtedy, gdy jaskrawość włókna żarówki doprowadzona zostanie do zrównania się z jaskrawością tła, będącego obrazem żarzącego się przedmiotu.

⁸⁾ To znaczy, że za wskazanie nominalne uważamy również wskazanie sprowadzone do tych warunków, np. objętość wymierzoną pojemnikiem przy 20 C, a zredukowaną do 0 C przez uwzględnienie współcz. rozszerzalności cieplnej materiału pojemnika.

„rzeczywistymi” one nie są, gdyż rzeczywistych miar rzeczy znać nie możemy. Używać tej nazwy należy przeto zawsze z zastrzeżeniem myślowym: rzeczywiste w granicach naszego poznania, w granicach błędów obserwacji. Wobec tego, nazwa wskazanie poprawne (indication correcte) jest znacznie właściwsza.

Uchybienie i poprawka.

Bezwzględną wartość różnicy między wskazaniem poprawnym a wskazaniem nominalnym nazywam uchybieniem

$$u = \text{mod } (I_c - I_n),$$

gdzie u oznacza uchybienie, I_c — wskazanie poprawne, I_n — wskazanie nominalne.

Poprawką wskazania narzędzia mierniczego δ jest ta miara, którą należy algebraicznie dodać do wskazania nominalnego, aby otrzymać wskazanie poprawne⁹⁾

$$I_c = I_n + \delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Powyższe określenie poprawki jest powszechnie przyjęte w literaturze metrologicznej. Również zgodnie rozumie się zawsze poprawkę, jako poprawkę wskazania¹⁰⁾.

Rozważmy parę przykładów. Oto mamy przymiar 10-centymetrowy, końcowy, bez podziałki (więc np. sprawdzian trzpieniowy); na przymiarze tym jest oznaczenie 10 cm. Te 10 cm to jest właśnie wskazanie nominalne. Przymiar normalny wskazuje (wskazanie poprawne), że długość sprawdzianu jest 100,01 mm. Poprawka wynosi przeto

$$\delta = + 0,01 \text{ mm},$$

gdyż taką właśnie miarę trzeba dodać algebraicznie do wskazania nominalnego, aby otrzymać wskazanie poprawne. Stąd wnioskujemy, że kiedy długość (miernicza) przymiaru jest za duża (w stosunku do tej długości, która poprawnie odpowiada oznaczeniu), to poprawka będzie dodatnia, i odwrotnie. W istocie, kiedy długość jest za duża, to znaczy, że wskazanie nominalne przymiaru, owe 10 cm, jest za małe i, żeby się stać poprawnym, powinno być powiększone.

Mierzenie tym przymiarem polega na stwierdzeniu, że pewna nieznaną nam przedtem długość jest, równa długości mierniczej przymiaru czyli, nominalnie, 10-ciu centymetrom

⁹⁾ W równaniach, zawierających wskazania w liczbach szczególnych i poprawki, dogodnie jest oznaczać przez „ I_n ” miarę poprawną wskazania nominalnego I_n , np. „5 g” = 5 g + 0,2 mg.

¹⁰⁾ W istocie u wzorców można by poprawkę stosować do wielkości, a nie do wskazania wzorca, lecz tego znaczenia poprawce nikt nie nadaje.

(wskazanie nominalne). Ta sama długość przy uwzględnieniu poprawki naszego przyrządu, tj. wyrażona poprawnie, wynosi: $(100 + 0,01)$ mm.

A więc, aby znaleźć poprawną wartość wymierzonej wielkości, trzeba algebraicznie dodać poprawkę do wskazania wzorca.

Przejdźmy teraz do przyrządów. Wodomierz wskazuje 1000 l, podczas gdy zbiornik mierniczy (przyrząd wyższej dokładności) — że woda, która przepłynęła przez wodomierz, zajmuje objętość 1002 l. Poprawka wynosi więc:

$$\delta = + 2 \text{ l.}$$

Jeżeli wymierzę tym wodomierzem nieznaną mi przedtem ilość wody i wodomierz wskaże 1000 l, to poprawnie będę miał 1002 l; jeżeli chcę odmierzyć poprawnie 1000 l, muszę od odmierzonej ilości wody odjąć 2 litry, albo zamknąć kurek wtedy, gdy wodomierz wskazywać będzie około 998 l¹¹⁾.

Te dwa przykłady zostały umyślnie rozpatrzone nieco szczegółowiej, aby wykazać, że nie ma żadnej różnicy w istocie pojęć: wskazanie nominalne wzorca i wskazanie nominalne przyrządu mierniczego.

Dla przyrządów, które mierzą ilości dowolne, nieograniczone, jak np. kurwimetr, gazomierz, licznik energii elektrycznej¹²⁾, wygodniej jest wyrażać poprawkę w zależności od wy-

¹¹⁾ Sprawa odmierzania pewnej z góry zadanej wielkości przy uwzględnieniu poprawki narzędzia mierniczego bywa zupełnie niepotrzebnie komplikowana. W świetle wyżej podanej teorii sprawa polega na rozwiązaniu równania pierwszego stopnia z jedną niewiadomą.

W istocie, gdy mierzymy nieznaną nam wielkość (wymierzamy), to przez zastosowanie poprawki znajdujemy jej miarę poprawną. Mamy

$$I_c = I_n + \delta,$$

gdzie I_n i δ znamy, a szukamy I_c .

Gdy natomiast chcemy poprawnie odmierzyć pewną daną wielkość, tzn., że znamy I_c . Założyliśmy, że znamy i δ . Szukamy natomiast tego wskazania nominalnego I_n , które odpowiada poprawnemu I_c , czyli że rzecz sprowadza się do rozwiązania poprzedniego równania względem I_n :

$$I_n = I_c - \delta.$$

A więc narzędzie poprawnie odmierza daną wielkość I_c wtedy, gdy wskazanie jego jest równe I_c mniej poprawka.

¹²⁾ Zegary są również przyrządami o nieograniczonym obszarze mierniczym, lecz dokładności o wiele wyższej. Przy tej dokładności pomiaru wpływ czynników ubocznych (zmiany temperatury, zmiany ciśnienia, wstrząśnienia itp.) jest tak wielki, że o stałości stosunku poprawki do wskazań mowy być nie może. Poprawka względna w zegarach wysokiej dokładności (porządku wielkości dziesiątych części sekundy na dobę i mniej) nazywa się *chodem* (Gang) i oblicza się na dobę. Poprawka bezwzględna nazywa się *stanem* (Stand).

mierzonej ilości, przyjmując, co dla tego rodzaju przyrządów małej dokładności jest na ogół zgodne z rzeczywistością, że poprawka $\delta = I_c - I_n$ rośnie proporcjonalnie do wymierzonej ilości I_n , czyli że, innymi słowy, stosunek:

$$\Delta = \frac{I_c - I_n}{I_n}, \quad \dots \quad (2)$$

noszący nazwę poprawki względnej, nie zależy od wartości wskazania I_n ¹³⁾.

Poprawkę względną wyrażamy często w procentach wskazania nominalnego, mianowicie nadając jej postać

$$\frac{I_c - I_n}{I_n} \cdot 100 \quad \dots \quad (2a)$$

Ustaliliśmy więc następujące zasady:

1) Poprawka jest miarą, która, algebraicznie dodana do nominalnego wskazania narzędzia mierniczego, daje wskazanie poprawne.

2) Poprawkę rozumie się zawsze jako *poprawkę wskazania* (nominalnego), tj. liczby odpowiadającej koincydencji wskaźników - protagonistów (a więc poprawka nigdy nie jest poprawką wielkości wzorca: odważnik za ciężki ma poprawkę dodatnią, bo oznaczenie jego jest za małe).

3) Poprawka, wyrażona stosunkiem lub w procentach, odnosi się zawsze do wskazania nominalnego.

¹³⁾ W istocie rzeczy stosunek $\delta : I_n = \Delta$ (a także e_i i E_d) jest zmienny wraz z I_n , lecz zmienności jego nie wykazują przyrządy miernicze handlowe i większość technicznych dla swej małej dokładności. Poza tym względne poprawki, błędy i uchybienia są niezależne od wskazań I_n tylko przy określonym i niezmiennym zespole warunków metrologicznych, tj. tych warunków wewnętrznych i zewnętrznych (w stosunku do narzędzia), które mogą wpływać na zmianę jego wskazań przy niezmiennym I_c . Jeżeli one są zmiennie, to o stałości Δ na ogół mowy być nie może. Więc np. błędy i poprawki wodomierza skrzydełkowego zależą od natężenia przepływu (rys. 4), licznika energii el-nej od mocy, pod którą on działa, od współczynnika mocy i in., zegara astronomicznego od temperatury, amplitudy wahań wahadła itd. Wreszcie zmieniają się poprawki i z biegiem czasu pod wpływem zużycia narzędzia mierniczego oraz skutkiem zmian fizycznych i chemicznych w materiałach, wchodzących w jego skład (metale, szkło, smary).

Znajomość poprawek narzędzia dla różnych określonych warunków, wpływających na jego wskazania, nie wystarcza więc do korygowania jego wskazań, jeżeli — co zawsze zachodzi w praktycznym zastosowaniu narzędzi mierniczych handlowych — nie są nam znane czasy oddziaływania każdej możliwej wartości każdego z warunków.

Jak widzimy z powyższych przykładów, pojęcie poprawki wystarcza całkowicie do posiłkowania się narzędziem mierniczym z dokładnością odpowiadającą warunkom, w których zostało sprawdzone. Zasady, dotyczące tego pojęcia, które wyżej wyłożyliśmy, są powszechnie przyjęte w metrologii.

Błąd wskazania.

Prócz pojęcia poprawki, posługujemy się w metrologii pojęciem błęd u, przy czym pojęcie to we wzorcach i przyrządach mierniczych używane bywa w dwóch zupełnie przeciwnych sobie znaczeniach, z czego sobie zwykle nie zdajemy sprawy.

Przeważnie rozumie się, że gdy przymiar jest za długi, odważnik za ciężki, opornik zbyt oporny (oczywiście, w stosunku do tych wskazań, które z nich odczytujemy), to wzorce te obciążone są błędem dodatnim.

A więc w tym przypadku błąd ma znak zgodny z poprawką. W istocie, skoro wielkości (miernicze) tych wzorców są za duże, to znaczy, że wskazania, które tym wielkościom mają odpowiadać (które mają być ich miarami), są za małe, a więc poprawki mają również dodatnie.

Z drugiej strony, gdy waga, wodomierz, licznik en. el. wskazują za dużo, — „śpieszą się”, jak się mówi w podobnym przypadku o zegarze, — to przyjęto uważać ich błędy za dodatnie.

Tutaj błąd i poprawka mają znaki przeciwne, gdyż to już ustaliliśmy, że gdy wskazanie jest za duże, to poprawka *dodana* do niego ma dać wskazanie poprawne, a więc sama ona musi być ujemna.

Sprawę więc należy wyjaśnić, aby móc ją uporządkować. Wyjaśnienie to nie jest trudne. We wzorcu mamy wskazanie i wielkość, którą wzorzec ten ucieleśnia i którą odtwarzamy mierząc tym wzorcem. Gdyby wielkość miernicza wzorca była ściśle równa jego odpowiedniemu wskazaniu, to, oczywiście, wzorzec byłby bez błędu. Lecz takich wzorców nie ma. Wielkość wzorca zawsze różni się od wskazania, które tej wielkości jest przypisane. Zachodzi pytanie, co przyjęć za punkt wyjścia: możemy bowiem uważać, że błąd jest we wskazaniu, bo ono różni się od odpowiadającej mu wielkości, albo odwrotnie, że wielkość jest obciążona błędem, gdyż nie jest równa wskazaniu. Możemy dopasować wskazanie do wielkości, lub odwrotnie — wielkość do wskazania. Jeżeli poprawnie zmierzona ma-

sa odważnika jest 1,02 g, a oznaczenie (wskazanie) jego 1 g, to możemy przyjąć, że błąd tkwi w jego masie, od której odjąć należy + 0,02 g, albo że błąd jest w oznaczeniu, od którego odjąć należy — 0,02 g.

Poprawkę odnosiliśmy zawsze do wskazania, tak u wzorców, jak u przyrządów mierniczych. Błąd natomiast u wzorców odnosimy do wielkości, u przyrządów — do wskazań. Nierozróżnianie w słownictwie błędu wskazania i błędu wielkości tworzy ów zamęt, o którym wspomniałem powyżej.

Uwzględniając powyższe, określimy osobno obydwa rodzaje błędów, mianowicie błąd wskazania i błąd wielkości.

Błędem wskazania narzędzia mierniczego nazywamy tę miarę, którą trzeba odjąć algebraicznie od wskazania nominalnego, aby otrzymać wskazanie poprawne. To określenie jest zgodne z potocznym znaczeniem wyrazu odjąć, znaczącego to samo, co pozbawić. Pozbawić zaś coś błędu znaczy uczynić bezbłędnym, czyli, wyrażając się ściślej, — poprawnym.

Posiadam np. pojemnik brzegowy, na którym jest oznaczenie 1 l. Za pomocą odważenia jego zawartości wodnej przekonywam się, że objętość jego wynosi 1,001 l. Błąd wskazania, albo — w tym przypadku — błąd oznaczenia, jest więc — 0,001 l. Mierząc tym pojemnikiem otrzymuję wskazanie 1 l, gdy w istocie odmierzyłem 1 l + 0,001 l cieczy. Narzędzie wskazuje za mało — błąd wskazania jest ujemny.

Jeżeli licznik en. el. wskazuje za dużo, błąd wskazań jest dodatni, gdy za mało — ujemny. Tak jest powszechnie przyjęte w literaturze licznikowej i nie tylko w niej, ale tak samo rozumie się błąd wodomierza, wagi¹⁴⁾ i w ogóle większości przyrządów mierniczych (nie wzorców, lecz przyrządów). Błędy odnosi się do wskazania, ale nie wymienia się, że to są błędy wskazań wagi, czy wodomierza, a mówi się wprost o błędach wagi, błędach wodomierza itp.

Ten sposób wyrażania doprowadza do szkodliwego pomieszania pojęć. Ktoś mówi: Mam wzorzec oporu elektrycznego, który ma przedstawiać 1 Ω . Poprawnie opór tego opornika wynosi 1,02 Ω . Wzorzec jest za duży, więc błąd jego jest dodatni.

Niepostrzeżenie w tym rozumowaniu zmieniony został znak błędu w stosunku do poprzedniej umowy. W istocie, jeżeli opór

¹⁴⁾ Zingler J. Theorie d. zusammengesetzten Waagen. Berlin, 1924, pag. 69. Smoleński T. Wagi wozowe i wagonowe. W-wa, 1929, pag. 22. Raudnitz M. Theorie d. Fehler v. Grosswaagen (Messtechnik, 1930), pag. 31.

mego wzorca wynosi poprawnie $1,02 \Omega$, a wskazanie tegoż wzorca jest 1Ω , to błąd wskazania jest ujemny, a nie dodatni, gdyż po odjęciu go od wskazania nominalnego otrzymamy wskazanie poprawne: $1 - (-0,02) = 1,02$. I rzeczywiście, wzorec ten wymierza za mało: miara, którą z niego odczytujemy ($I_n = 1 \Omega$), gdy go na miejsce mierzonego równego mu oporu do obwodu wprowadzamy, jest mniejsza od poprawnej miary tegoż oporu ($I_c = 1,02 \Omega$); gdy bowiem porównamy z jego oporem opór mierzony i znajdziemy go równym mu, to odczytawszy oznaczenie naszego opornika (wskazanie nominalne $I_n = 1 \Omega$) orzeczemy, że opór mierzony jest równy 1Ω , a ponieważ poprawna miara tego samego oporu wynosi $1,02 \Omega$, tj. więcej, przeto nasz opornik wskazuje za mało i jego błąd wskazania jest ujemny.

W literaturze metrologicznej nie stosuje się błędów wskazań do wzorców, gdzie go się zwyczajnie zastępuje błędem wielkości, który omówię później. Natomiast, jeżeli przy badaniu przyrządów mierniczych wprowadza się pojęcie błędu, to prawie zawsze ma się na myśli błąd, który powyżej nazwany został błędem wskazań.

W przyrządach o obszarze mierniczym nieograniczonym stosuje się pojęcie błędu względnego. W przeciwieństwie do poprawki względnej, błąd względny odnosi się nie do nominalnego, lecz do poprawnego wskazania i wyraża się go wzorem:

$$e_t = \frac{I_n - I_c}{I_c} \dots \dots \dots (3)$$

lub, częściej, stosunkiem procentowym

$$e_t = \frac{I_n - I_c}{I_c} \cdot 100, \dots \dots \dots (3a)$$

gdzie e_t oznacza błąd wskazań¹⁵⁾, zaś I_n i I_c mają poprzednie znaczenia.

Gdyby błąd był wyrażany w stosunku do wskazania nominalnego (a nie poprawnego), to zależność między poprawką a błędem wskazań byłaby najprostsza, mianowicie poprawka równałaby się błędowi, wziętemu z przeciwnym znakiem.

Skutkiem odmienności mianowników w wyrażeniach względnego błędu i względnej poprawki, zależności te są bardziej złożone. Wątpić można, czy rozbieżność ta jest dostatecznie usprawiedliwiona.

¹⁵⁾ e_t — error indicationis.

Posługując się wprowadzonymi oznaczeniami, ustalić możemy z łatwością¹⁶⁾ następujące zależności między błędem e_i i poprawką. Mianowicie:

$$I_c = I_n \frac{1}{1 + e_i} = I_n (1 - e_i + e_i^2 - \dots) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta}{e_i} = - \frac{I_c}{I_n} \quad \dots \quad (5)$$

$$\Delta + e_i = - \Delta e_i,$$

skąd

$$\Delta = - \frac{e_i}{1 + e_i} = - e_i + e_i^2 - e_i^3 + \dots \quad (6)$$

Wzór (4) możemy przepisać w postaci

$$I_n = I_c (1 + e_i),$$

skąd wynika, że I_n i I_c są liczbami tego samego znaku. W istocie, aby te liczby mogły być znaków przeciwnych, e_i musiałoby być mniejsze od ujemnej jedności, to jest, innymi słowy, błąd przyrządu przekraczałby 100% każdego wskazania poprawnego, tzn., że wodomierz np. musiałby się cofać, kiedy woda przez niego przepływa. Oczywiście, takich przyrządów nie ma.

Skoro więc liczby I_c i I_n są obie albo dodatnie albo ujemne, to ze wzoru (5) wynika, że Δ i e_i są zawsze znaków przeciwnych. Ze wzorów określających Δ i e_i wypływa, że gdy

$$I_c > I_n, \quad \text{to} \quad \Delta > |e_i|,$$

a gdy

$$I_c < I_n, \quad \text{to} \quad |\Delta| < |e_i|.$$

Zastosujemy teraz pojęcie błędu wskazań do niektórych szczególnych przypadków.

Przywykliśmy uważać za narzędzia miernicze (i tak je nazywać) nie tylko samodzielne narzędzia, lecz także i takie, które dopiero w połączeniu z innymi stanowią zespół mierniczy, zdolny do wykonywania pomiarów. Takimi zespołami są cyrkiel i przymiar, waga odważnikowa i komplet odważników, galwanometr i komplet oporników (do pomiaru oporu metodą substytucji), transformator mierniczy i licznik energii

¹⁶⁾ Równanie (5) otrzymujemy dzieląc częściami równanie (2) przez (3). Z równ. (5), na podstawie własności proporcji, wynika.

$$(\Delta + e_i) : \Delta = (I_n - I_c) : (-I_c = -e_i).$$

elektrycznej (transformatorowy). W takich zespołach możemy, oczywiście, rozpatrywać, niezależnie od poprawek i błędów całego zespołu, także poprawki i błędy osobnych jego członów. Oczywiście, określając poprawki czy błędy członów, zakładamy, że pozostałe człony dają wskazania poprawne. Wyjaśnimy to przykładem. Wskazanie wagi odważnikowej równoramiennej przy odważaniu zwyczajnym (handlowym) daje odczytanie sumy oznaczeń odważników na szalce odważnikowej. Jeżeli szukamy poprawki i błędu takiej wagi, samej w sobie, to nie tylko dla znalezienia wartości **wskazania poprawnego** musimy posługiwać się odważnikami o wskazaniach poprawnych (i w rzeczywistości np. w urzędach miar używamy do tego celu odważników wysokiej dokładności), ale także zakładamy, że **wskazanie nominalne** otrzymaliśmy za pomocą odważników poprawnych. W przeciwnym razie znaleźlibyśmy poprawkę albo błąd nie samej wagi, lecz całego zespołu: waga + odważniki. Nawiasem dodać można, że taka poprawka czy błąd nie miałyby żadnej wartości wobec zmieniania się odważników na szalce przy odważaniu różnych ilości. Do użytku praktycznego raczej może być potrzebna znajomość poprawki wagi i poprawek odważników każdego oddzielnie.

Możemy wreszcie poszukiwać błędów nie tylko wskazań narzędzi mierniczych, ale nawet poszczególnych ich własności i oddzielnych elementów, z których są zbudowane. Tak np. w wadze nierównoramiennej i w transformatorze mierniczym mamy do czynienia z przekładnią. Mówimy o błędzie przekładni. W wadze złożonej możemy iść jeszcze dalej: możemy rozpatrywać błąd przekładni którejkolwiek z jej oddzielnych dźwigni. Zastosowanie pojęcia błędu wskazań nie do całości narzędzia mierniczego, lecz do jego jednej własności lub części, która wskazań miary przecież nie daje, wymaga pewnych dodatkowych wyjaśnień, pewnego uogólnienia pojęcia „wskazanie”.

W istocie na wadze nierównoramiennej odważnikowej, np. dziesiętnej, setnej, mamy oznaczenie przekładni w postaci $\times 10$, $\times 100$; na transformatorze np. prądowym — w postaci ułamka, wyrażającego stosunek natężenia prądu pierwotnego do natężenia prądu wtórnego (np. $300/15$ A). Tę przekładnię, wskazaną na przyrządzie, odgrywającą rolę analogiczną do oznaczenia np. jednomiarowego przymiaru, będziemy uważali za wskazanie nominalne, czyli ⁶⁾ oznaczenie nomi-

nalne przekładni. Jeżeli chodzi o przekładnię jednej z wielu dźwigni wagi złożonej, to na niej, oczywiście, oznaczenia nie znajdujemy. Natomiast, na podobieństwo owego domyślnego oznaczenia przy którejkolwiek kresce przymiaru kreskowego, znajdziemy warunek konstrukcyjny, któremu zadość musi czynić przekładnia danej dźwigni. Przekładnię wynikającą z takiego warunku konstrukcyjnego uważamy z natury rzeczy również za oznaczenie (wskazanie) nominalne przekładni danego przyrządu lub danej jego części. Oznaczeniu poprawnemu przekładni danej dźwigni, wagi czy transformatora odpowiada, oczywiście, ten stosunek ramion, względnie natężeń prądów, który poznaliśmy za pomocą kontrolnego pomiaru.

Określamy błąd przekładni zgodnie z ogólnym określeniem błędu wskazania, mianowicie: *błąd wskazania przekładni* jest liczbą, którą trzeba odjąć od nominalnego wskazania (oznaczenia) przekładni, aby otrzymać wskazanie poprawne („rzeczywistą” wartość danej przekładni).

Nie ma potrzeby powtarzać określenia błędu względnego; jest ono analogiczne do określenia błędu wskazania narzędzia mierniczego, ale to zauważyć należy, że tak jak i w określeniu błędu narzędzia mierniczego nacisk musi być położony na wyrazie *wskazanie* (poprawne przekładni istniejącej). Pominięcie wyrazu „wskazanie” nadałoby inne zgoła, wręcz przeciwne znaczenie temu wyrażeniu (poprawna przekładnia).

Możemy oceniać nie tylko błąd organu, części narzędzia mierniczego, lecz również błąd, wywołany wpływem pewnego zjawiska, a więc na przykład możemy rozważać błąd oznaczenia przekładni dźwigni, spowodowany ugięciem dźwigni. W tym przypadku, oczywiście, przyjąć musimy, zgodnie z dotychczasowymi umowami, za wskazanie nominalne — przekładnię dźwigni nieodkształconej, a za wskazanie poprawne — przekładnię dźwigni ugiętej. Możemy, idąc jeszcze dalej, rozważać błąd wskazania długości ramienia dźwigni na skutek niedostatecznie dokładnego wykonania, dla którego, oznaczając przez l poprawną długość dźwigni (całej), przez k przekładnię nominalną (wskazaną), przez l_c poprawną długość danego ramienia, otrzymamy:

$$e_l = \frac{\frac{k}{k+1} l - l_c}{l_c}.$$

Mówiliśmy już o tym, że jeżeli w zespole mierniczym poszukujemy błędu jednego z jego członów, musimy znaleźć takie określenie nominalnego wskazania tego członka, aby błędy innych członów nie wpływały na nie. To samo odnosi się, oczywiście, do poszczególnych organów lub własności jednego narzędzia mierniczego. Zachodzi więc między wskazaniem nominalnym wagi albo transformatora mierniczego (jako jednego z członów odpowiednich zespołów mierniczych), wskazaniem poprawnym następującego członka (odważników, amperomierza) a nominalnym oznaczeniem K_n przekładni wagi albo transformatora następujący podstawowy związek o charakterze definicji:

$$I_{2c} K_n = I_{1n}, \quad \dots \quad (7)$$

gdzie w przypadku wagi I_{2c} oznacza sumę poprawnych wskazań odważników, znajdujących się na szalce odważnikowej¹⁷⁾, a I_{1n} nominalne wskazanie wagi, tj. miarę masy znajdującej się na pomoście wagi, uzyskaną za pomocą odważników poprawnie oznaczonych i nominalnego wskazania przekładni wagi. Podobnie w transformatorze mierniczym prądowym I_{2c} oznacza natężenie prądu wtórnego, zmierzone poprawnie, zaś I_{1n} natężenie nominalne prądu pierwotnego¹⁸⁾.

W świetle tych rozważań powróćmy do określenia błędu wskazań transformatora mierniczego. Wzór ogólny (3) musi być, oczywiście, zastosowany w myśl określenia błędu do prądu w uzwojeniu pierwotnym, bo transformator służy do tego, aby ten właśnie prąd mierzyć. Wzór (3) przybierze więc postać:

$$e_i = \frac{I_{1n} - I_{1c}}{I_{1c}} \cdot 100. \quad \dots \quad (8)$$

Rugując w tym wzorze wartość I_{1n} za pomocą równania (7), otrzymamy:

$$e_i = \frac{K_n I_{2c} - I_{1c}}{I_{1c}} \cdot 100, \quad \dots \quad (9)$$

¹⁷⁾ Porównaj Zingler, l. c. pag. 71.

¹⁸⁾ Oczywiście, że określenie wskazania przekładni transformatora, tak jak to czynią „Regeln für Wandler VDE 0,512” § 3-ci, jako stosunek nominalnego prądu (natężenia) pierwotnego do nominalnego prądu (natężenia) wtórnego, szwankuje logicznie, aczkolwiek daje ten sam wynik (p. niżej).

zgodnie z określeniem Międzynarodowej Komisji Elektrycznej¹⁹⁾,²⁰⁾.

Jeszcze jedno należy tutaj ustalić. Jest jasne, że możemy oczekiwać, że wzór na błąd czy poprawkę wyrazi ją w postaci, którą przyjęliśmy dla określenia tych pojęć, tylko wtedy, gdy wchodzi do niego bezpośrednio liczby I_n i I_c . Gdy natomiast w dalszych przekształceniach wartości te zastąpimy przez inne od nich zależne, to wzory te przybiorą inną postać. Np. wracając jeszcze do transformatora prądowego i zastępując we wzorze (9) I_{1c} przez $K_n I_{2n}$ ²¹⁾, otrzymamy:

$$e_i = \frac{I_{2c} - I_{2n}}{I_{2n}} \cdot 100 \text{ } ^{22)}$$

Tutaj wskaźniki c i n w stosunku do wzoru (3) zmieniły miejsca. Oczywiście, zmiana taka zawsze nastąpi, ile razy na miejsce I_n i I_c wprowadzimy wartości do nich odwrotnie proporcjonalne. Tę zamianę można dosyć nieprzyjemnie odczuwać, jeżeli się zapomina, że, ogólnie biorąc, od wzorów (2) i (3) tylko wtedy można wymagać zachowania właściwej im konstrukcji w stosunku do wskaźników c i n , gdy wskaźniki te stosuje się bezpośrednio do wskazań, które pojęciowo błąd (albo poprawkę)

¹⁹⁾ C. E. I. Recommendations de la CEI pour les transformateurs de mesure. Londres, 1931, pag. 2 i 6.

²⁰⁾ Ponieważ

$$I_{1c} = K_c I_{2c}$$

$$I_{1n} = K_n I_{2c}$$

przeto

$$\frac{I_{1n} - I_{1c}}{I_{1c}} = \frac{K_n - K_c}{K_c}$$

tj. błąd wskazań wagi odważnikowej lub transformatora mierniczego jest równy błędowi oznaczenia przekładni.

Dotychczas panujący brak ustalonych zasad w określaniu pojęcia błędu, czemu tutaj zaradzić usiłujemy, powoduje zupełną, a wielce szkodliwą dowolność w tym kierunku w literaturze, dotyczącej liczników i transformatorów mierniczych. A więc np. Krukowski (Grundzüge d. Zählertechnik, Berlin, 1930, pag. 324) określa błąd przekładni wzorem dla poprawki: $(I_c - I_n) : I_n$. Wynik jest taki, że błąd oznaczenia przekładni i błąd wskazania transformatora mają znaki przeciwne. Natomiast Goldstein I. (D. Messwandler, Berlin, 1928, pag. 135) określa ten sam błąd wzorem: $(I_n - I_c) : I_n$, tj. jako proponowany przeze mnie błąd E_f (p. niżej).

²¹⁾ Oczywiście, wobec małości błędu transformatora:

$$K_n = \frac{I_{1c}}{I_{2n}} = \frac{I_{1n}}{I_{2c}}$$

²²⁾ Krukowski W. Grundzüge d. Zählertechnik, Berlin, 1930, pag. 324. Regeln für Wandler l. c. § 8.

określają, a nie do parametrów²³⁾, których one są funkcjami. Na to nie ma rady: prawa matematyczne i zjawiska przyrody mało się o to troszczą, aby wyrażać się w postaci łatwej do przyjęcia przez umysł ludzki.

Błąd wielkości.

Dotychczas zakładaliśmy, że wskazanie nominalne jest błędne, że ono wymaga poprawki, gdyż nie jest zgodne z wielkością wymierzoną. Lecz gdy chodzi o wzorce, możemy sprawę z innej strony rozpatrywać, umawiając się, że nie wskazanie będziemy uważali za błędne, lecz wielkość, którą wzorzec ma określać²⁴⁾. Dochodzimy w ten sposób do nowego pojęcia błędu

²³⁾ Wskaźnikiem n można np. oznaczać każdy parametr wskazań, który jest wyłącznie funkcją danych, podanych na narzędziu, zaś wskaźnikiem c — taki, który ma charakter wielkości poprawnej, tj. gdy wynika wyłącznie z obserwacji narzędzi mierniczych normalnych.

Więc np. w licznikach energii elektrycznej stała (liczba obrotów tarczy, odpowiadająca 1 kWh) podana na tabliczce jest niewątpliwie stałą nominalną C_n , natomiast teoretyczna stała, którą otrzymujemy, dzieląc zaobserwowaną ilość obrotów licznika przez funkcję wskazań przyrządów normalnych (sekundomierza i np. watomierza), to jest poprawna liczba obrotów tarczy, odpowiadająca 1 kWh, już tylko z pewnym stopniem dowolności może być oznaczona przez C_c . Zupełnie już bezużyteczne byłoby głowienie się nad tym, który z dwóch czasów oznaczyć przez n , względnie przez c , czy ten zmierzony sekundomierzem, w którym licznik wskaże A_n kilowatogodzin, czy ten, w którym ten sam licznik, jednak tak (myślowo) przekonstruowany, że w tych samych warunkach, obracając się wolniej, względnie pośpieszniej, dałby to samo co poprzednio wskazanie (A_n), tym razem już poprawnie. Wprowadzenie w tym przypadku wskaźników n i c nie dawałoby zresztą żadnych udogodnień, tak jak zapewne nie daje ich w pracach niemieckich dowolne operowanie wskaźnikiem \mathcal{S} (Sollwert), stosowanym już to do wskazań nominalnych, już to do wskazań poprawnych. Lepiej przyjąć dla tych czasów oznaczenie odmienne, np. t_m (mierzony) i t_c . Wtedy wygląd oznaczenia od razu przypomni właściwą wielkość bez ryzyka pomyłek.

²⁴⁾ Przez tę umowę nie zmieniamy bynajmniej charakteru wartości I_n i I_c . Określenia i właściwości wskazań normalnego i poprawnego pozostają niewzruszone. Jakkolwiek bowiem określimy błąd — a jest to rzeczą umowną — wskazanie wzorca sprawdzanego pozostaje wskazaniem nominalnym i daje w ogóle błędny wynik pomiaru, a odpowiednie wskazanie wzorca normalnego pozostaje wskazaniem poprawnym.

Piękny jak klejnot, wykonany z jednego kawała kryształu górskiego, wzorzec normalny pierwszej klasy kilograma Głównego Urzędu Miar był początkowo za ciężki o 306,6 mg. Błąd ten e_ξ polerowaniem materiału doprowadzony został do 5,11 mg. Jego wskazanie nominalne (oczywiście domyślne) jest więc błędne, mianowicie:

$$„1 \text{ kg}” = 1 \text{ kg} + 5,11 \text{ mg}$$

i błąd wielkości tego wzorca e_ξ równy $+ 5,11 \text{ mg}$ jest tą masą, którą trzeba by jeszcze spolerować, by go uczynić doskonałym (w granicach naszego poznania). To, co było lub jeszcze pozostaje do spolerowania, jest realnym uzmysłowieniem błędu e_ξ .

wielkości wzorca. Przez *błąd wielkości wzorca miary* rozumie się taką wielkość (odcinek, pole, objętość, masę, opór elektryczny itp.), która algebraicznie odjęta²⁵⁾ od istotnej (rzeczywistej)²⁶⁾ wielkości mierniczej wzorca, czyni ją równą wielkości, której miarą poprawną jest wskazanie wzorca.

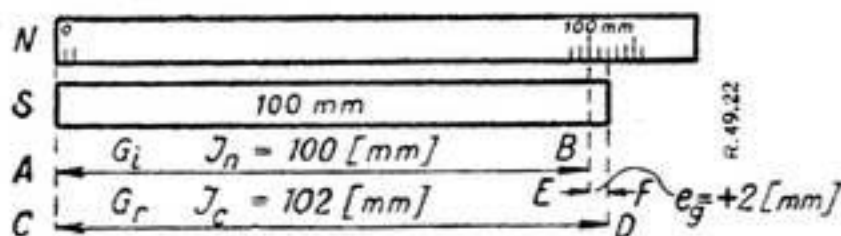
Jeżeli przez G_r ²⁷⁾ oznaczymy rzeczywistą wielkość wzorca, przez G_i ²⁸⁾ tę wielkość, którą powinien posiadać, a przez e_g błąd wielkości, to

$$G_r - e_g = G_i \dots \dots \dots (10)$$

Dla określenia znaku tego błędu przyjęliśmy więc to samo, co przedtem, правило: odjąć błąd — uczynić poprawnym.

Wzorzec jest dlatego obarczony błędem, że miara tej wielkości, którą on przedstawia, nie jest równa jego oznaczeniu, a więc i wskazaniu, które on daje. Sprawdzamy go przez porównanie z wzorcem normalnym, przyjmując, że wzorzec normalny odtwarza ową wielkość z wystarczającą dokładnością²⁹⁾.

Wzorzec normalny wyraża to, co wzorzec sprawdzany powinien był wyrazić. Wielkość miernicza G_i wzorca normalnego, odpowiadająca wskazaniu (oznaczeniu) I_n wzorca sprawdzanego (rys. 1), jest więc tą wielkością, którą wzorzec S powinien



Rys. 1. N — przymiar normalny; S — przymiar sprawdzany; $AB = G_i$ — długość na przymiarze N , odpowiadająca oznaczeniu przymiaru S ; $CD = G_r$ — rzeczywista długość przymiaru S , której miarą poprawną jest $I_r = 102 \text{ mm}$; EF — błąd wielkości przymiaru S ; e_g — miara tego błędu = $+2 \text{ mm}$.

²⁵⁾ Określoność pojęcia odejmowania wielkości wynika z określoności pojęcia ich dodawania, a to ostatnie jest koniecznym warunkiem mierzalności wielkości.

²⁶⁾ W tym przypadku „rzeczywistej” bez wszelkiej wątpliwości.

²⁷⁾ G — grandeur, Grösse (granditas); r — realis.

²⁸⁾ i — indicata.

²⁹⁾ Jeżeli we wzorcu normalnym uwzględniamy poprawkę, to znaczy, że w istocie rzeczy porównujemy wzorzec sprawdzany z wzorcem, który posłużył do sprawdzenia wzorca normalnego. Ten ostatni jest tylko pośrednikiem w tym przypadku. Takimi pośrednikami „reprezentantami” są w stosunku do prototypów międzynarodowych metra i kilograma prototypy państwowe.

posiadać (Sollgrösse), — której miara jest na nim oznaczona. Czyli że miara tej wielkości wzorca normalnego jest właśnie wskazaniem nominalnym wzorca sprawdzanego. Z drugiej strony oznaczenie wzorca normalnego, odpowiadające tej jego wielkości, która jest równa rzeczywistej wielkości wzorca sprawdzanego, jest jej miarą poprawną, a więc jej oznaczeniem (wskazaniem) poprawnym. Dzieliąc obie strony równania (10) przez jednostkę długości, otrzymamy na miejscu każdej z tych trzech wielkości jej miarę, a więc w myśl powyżej wyłożonego:

$$\begin{aligned} & I_c - e_g = I_n \\ \text{czyli} & I_c - I_n = e_g ; \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

stąd (1), oznaczając przez ε_i bezwzględny błąd wskazania,

$$e_g = \hat{\varepsilon} = -\varepsilon_i, \dots \dots \dots (12)$$

a zatem błąd wielkości³⁰⁾ jest zgodny z poprawką co do wartości i znaku.

Gdy wzorcem zmierzmy wielkość równą którejkolwiek z tych, które są w niego wcielone (inkorporowane), to odtworzymy ją w mierzonym czynniku. Wielkość odmierzona wzorcem jest więc powtórzeniem wielkości mierniczej wzorca, powtarza się tedy w niej również błąd wielkości wzorca³¹⁾.

Jeżeli więc przyjmiemy, że błędem ilości wymierzonej jest różnica między ilością wymierzoną poprawnie a wymierzoną nominalnie, to błąd ten jest niczym innym, jak błędem wielkości wzorca. To spostrzeżenie pozwala rozciągnąć pojęcie błędu wielkości z wzorców na przyrządy, a tym samym na ogół narzędzi mierniczych, określając błąd wielkości narzędzia mierniczego jako tę ilość, którą trzeba odjąć od ilości tym narzędziem wymierzonej, aby uzyskać taką ilość, której miarą poprawną byłoby wskazanie narzędzia³²⁾.

³⁰⁾ Ściślej: miara błędu wielkości.

³¹⁾ Powstaje prócz tego dodatkowy błąd pomiaru, którym tutaj nie zajmujemy się.

³²⁾ Zingler l. c. pag. 70 nazywa błąd ten błędem „użytecznego ładunku” (*Fehler der Nutzlast*) i określa go (dla wag odważnikowych) jak następuje: Nasza waga: ładunkowe i odważnikowe obciążone są odważnikami normalnymi w nominalnych ilościach. Z powodu błędu wagi w zasadzie nie dojdzie do wyznaczonego położenia równowagi. Aby ją do niego doprowadzić, trzeba do nominalnego użytecznego ładunku dołożyć dokładkę (Zulage) Z, która może być dodatnią lub ujemną, odpowiednio do tego, czy dla wyrównania wagi potrzebna jest rzeczywista dokładka, czy też ujemna dokładka. Możemy

Przede wszystkim w tym przypadku nie ma różnicy między wzorcami a przyrządami, które zawierają w sobie wzorzec miary jako jeden z organów³³⁾. W ogóle zaś w przyrządach, które posiadają podziałkę, można ustalić pewien prosty związek między błędami wielkości a położeniem wskaźników podziałki. Mianowicie błąd wielkości w danym miejscu podziałki jest błędem położenia wskaźnika, znajdującego się w tym miejscu.

Objaśnijmy tę rzecz przykładem. Gazomierz normalny (tj. gazomierz większej dokładności z dużą tarczą) wskazuje 100,4 l zamiast 100,0 l (wymierza za dużo!), tzn., że odcinek podziałki 0 ÷ 100,0 (rys. 2) jest za krótki. Kreskę 100,4 powinien był jego konstruktor przesunąć w kierunku ruchu wskazówki, a w tym miejscu, gdzie jest kreska 100,4, dać kreskę 100,0. A więc działka 0 ÷ 100,4 jest za krótka. Zachowując правило: odjąć błąd — uczynić poprawnym, musimy przypisać błędowi tej działki znak mniej. Ilość wymierzona wynosi poprawnie również 100,0 l, zaś przypisuujemy jej wskazanie 100,4 l. Tak samo wymierzylibyśmy wzorcem posiadającym oznaczenie 100,4 l, a pojemność 100,0 l. Błąd wielkości tego wzorca byłby również — 0,4 l.



Rys. 2.

Błąd wielkości danej działki *wymierzony*³⁴⁾ *działką*, odpowiadającą jednostce miary, w której przyrząd jest wywor-

więc wyobrażać sobie, że ładunek na pomoście składa się z dwóch części, mianowicie wskazania nominalnego, odczytanego po stronie odważnikowej, i dokładki potrzebnej do doprowadzenia wagi do wyznaczonego położenia równowagi. Dokładka Z stanowi więc błąd ładunku użytecznego, równy różnicy: wskazanie poprawne ład. użyteczn. mniej jego wskazanie nominalne.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

Określenie to jest całkowicie zgodne z wyżej podanym określeniem ogólnym.

cowany, jest równy błędowi ilości odmierzonej daną działką, wyrażonemu w jednostkach, w których przyrząd jest wywzorcowany.

Powyższe rozważania dają się streścić w sposób następujący: należy rozróżnić dwa rodzaje błędów: *błędy wskazań* i *błędy wielkości*. Wyrażenia takie, jak błąd wagi, błąd przekładni, w których opuszczono rodzaj błędu, nie są określone. Błędy wskazań stosuje się do badania przyrządów mierniczych, błędy wielkości prawie wyłącznie do wzorców miar. Bezwzględne błędy wskazań są liczbami symetrycznymi do poprawek. Błędy wielkości są równe poprawkom co do wartości i znaku. Względne błędy wskazań przyjęto wyrażać w stosunku (najczęściej procentowym) do wskazania poprawnego, skutkiem czego związek ich z poprawkami względnymi nie jest tak prosty, jakby sobie tego w interesie ekonomii pracy życzyć należało.

Co do uchybień względnych, to wystarczy nadmienić, że bezwzględne wartości (moduły) poprawki względnej lub błędu względnego są względnymi uchybieniami wskazań, odniesionymi do wskazania nominalnego w pierwszym przypadku, a do poprawnego — w drugim.

Parę słów jeszcze poświęcić by należało pytaniu, czy istotnie dla badań narzędzi mierniczych potrzebne są obok pojęcia poprawki pojęcia błędu, czy nie było by korzystne, w sensie ekonomii pracy, ograniczyć się przynajmniej do rozważania jednego tylko rodzaju błędu, a przede wszystkim czy jest pożyteczne upowszechnione odnoszenie względnego błędu wskazań do wskazania poprawnego.

Aby odpowiedzieć na to pytanie, musimy zanalizować potrzebę i korzyść posługiwania się tymi funkcjami w nauce o narzędziach mierniczych i w ich stosowaniu.

Oczywiście, żadnej wątpliwości podlegać nie może potrzeba wprowadzenia pojęcia poprawki. W każdym dokładniejszym pomiarze musimy uwzględniać poprawki wskazań, jeżeli nie chcemy być zdani na łaskę i niełaskę konstruktora narzędzia mierniczego. Potrzeba korzystania z poprawek zachodzi nieraz

nawet przy względnie prostych pomiarach, jakie mają miejsce w urzędach miar niższych instancyj przy sprawdzaniu narzędzi mierniczych handlowych, pomimo że tutaj, dla ułatwienia pracy urzędnika legalizującego, zawsze staramy się, aby narzędzia miernicze normalne były tak starannie wywzorcowane, by właśnie można było obyć się bez poprawek. Wypadek taki zachodzi np. przy sprawdzaniu odważników miligramowych. Na ogół tablice poprawek są dogodniejsze przy pracy od tablic wskazań poprawnych, ze względu na łatwiejszą interpolację.

Poprawka względna zawsze wyraża się w częściach lub procentach wskazania nominalnego. Jest to zwyczaj słuszny, gdyż umożliwiający najprostsze przejście rachunkowe do wskazania poprawnego.

Co do błędów bezwzględnych, to, aczkolwiek wydaje się, że korzystanie z pojęcia błędu wskazań mogłoby być zawsze zastąpione użyciem poprawki, jednak ze względu na rachunkową prostotę przejścia od poprawki do błędu nie widzę poważniejszych przyczyn do dążności usunięcia tych pojęć z metrologii. Zresztą niewątpliwie językowo i wyobrażeniowo jest dogodniej w wielu przypadkach posługiwać się pojęciem błędu niż poprawki, szczególnie o ile chodzi o części narzędzia lub jego własności. Ważne jest natomiast to, aby w nazwach obu błędów były konsekwentnie używane odróżniające je od siebie wyrazy.

Pozostaje względny błąd wskazań, a właściwie zwyczaj wyrażania go w częściach lub procentach wskazania poprawnego. Względne błąd i poprawka są odmiennymi funkcjami wskazań nominalnego i poprawnego. Uzyskanie poprawki z błędu jest rachunkowo niedogodne. Czy w istocie odnośnienie pojęcia błędu względnego do wskazania poprawnego ma za sobą poważne podstawy i czy nie było by właściwe odnosić ten błąd, tak jak i poprawkę, do wskazań nominalnych? Oznaczmy tak określony błąd przez E_i :

$$E_i = \frac{I_n - I_c}{I_n}, \quad (13)$$

czyli

$$E_i = - \Delta,$$

Aby odpowiedzieć na postawione pytanie, przede wszystkim musimy zbadać, jak wielką byłaby różnica między określonym już uprzednio błędem e_i i tym nowym błędem E_i .

Z równań (13) i (3) otrzymujemy

$$\frac{E_i}{e_i} = \frac{I_c}{I_n},$$

skąd

$$e_i - E_i = \frac{e_i^2}{1 + e_i} = e_i^2 - e_i^3 + e_i^4 - \dots$$

Łatwo możemy sprawdzić, że błędy e_i i E_i są zawsze jednakowego znaku, dalej, że

$$\frac{e_i^2}{1 + e_i}$$

jest dla każdego $e_i > -1$ dodatnie.

Przypadek, kiedy $e_i < -1$ ($e_i < -100\%$), możemy odrzucić, gdyż odpowiada on błędowi niespotykanemu, równemu lub przekraczającemu w swej wartości bezwzględnej wskazanie przyrządu. Zależność różnicy $e_i - E_i$ od e_i przedstawiona jest w poniższej tabeli.

Tabela wartości różnicy błędów $e_i - E_i$ w zależności od błędów e_i w procentach³⁵⁾.

| e_i | $e_i - E_i$ | e_i | $e_i - E_i$ | e_i | $e_i - E_i$ | e_i | $e_i - E_i$ | e_i | $e_i - E_i$ |
|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| -20 | 5,000 | -10 | 1,111 | | | + 1 | 0,010 | 11 | 1,090 |
| -19 | 4,457 | - 9 | 0,890 | -0,8 | 0,006 | 2 | 0,039 | 12 | 1,286 |
| -18 | 3,951 | - 8 | 0,696 | -0,6 | 0,004 | 3 | 0,087 | 13 | 1,496 |
| -17 | 3,482 | - 7 | 0,527 | -0,4 | 0,002 | 4 | 0,154 | 14 | 1,719 |
| -16 | 3,048 | - 6 | 0,383 | -0,2 | 0,000 | 5 | 0,238 | 15 | 1,956 |
| -15 | 2,647 | - 5 | 0,263 | 0 | 0,000 | 6 | 0,340 | 16 | 2,207 |
| -14 | 2,279 | - 4 | 0,167 | +0,2 | 0,000 | 7 | 0,458 | 17 | 2,470 |
| -13 | 1,942 | - 3 | 0,093 | +0,4 | 0,002 | 8 | 0,593 | 18 | 2,746 |
| -12 | 1,636 | - 2 | 0,041 | +0,6 | 0,004 | 9 | 0,743 | 19 | 3,034 |
| -11 | 1,360 | - 1 | 0,010 | +0,8 | 0,006 | 10 | 0,909 | 20 | 3,333 |

Pojęciem błędu w z g l ę d n e g o posiłkujemy się przy badaniu narzędzi mierniczych handlowych i technicznych sumujących o nieograniczonym obszarze mierniczym³⁶⁾.

Jeżeli rozpatrywać będziemy narzędzia miernicze tego rodzaju z punktu widzenia wytwórczego, a więc narzędzia nowe, to liczyć się musimy z uchybieniami nie przekraczającymi na ogół 2% przy normalnych obciążeniach. W tym przypadku różnica między błędem odniesionym do wartości poprawnej a błędem odniesionym do wartości nominalnej nie przekracza 0,00041,

³⁵⁾ Tj. e_i w procentach I_c , a E_i w procentach I_n .

³⁶⁾ Albo raczej: o periodycznym obszarze mierniczym.

czyli 0,041%. Rząd wielkości tych liczb jest o tyle niższy od dokładności, z jaką możemy wyznaczać błędy w narzędziach handlowych i technicznych, że jest zupełnie obojętne, czy błędy te wyznaczać będziemy w tych warunkach w postaci e_i czy E_i .

Błędy e_i wyznajduje się nie dla późniejszego uwzględniania ich przy mierzeniu, lecz raczej dla oceny zalet metrologicznych przyrządu i wpływu różnych czynników na jego dokładność.



R. 49 24

Rys. 3.

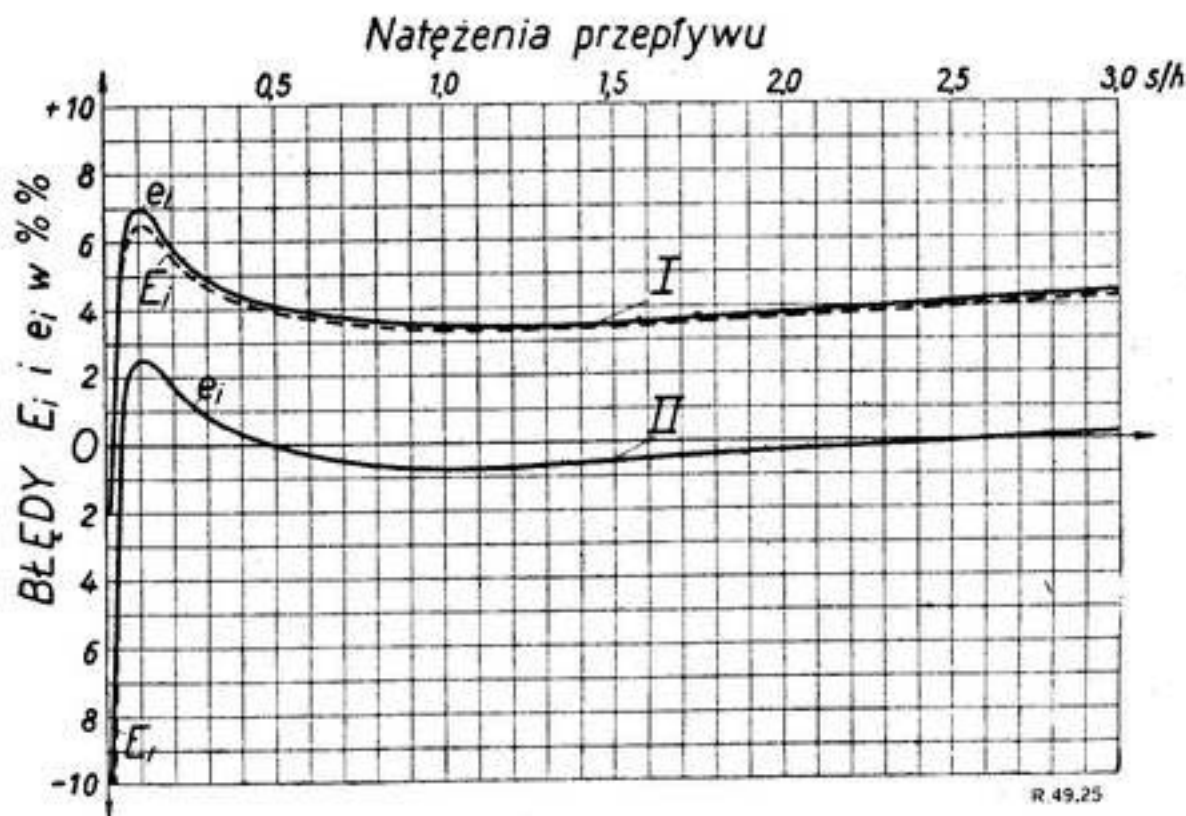
Rys. 3 i 4 uwidaczniają, że krzywe błędów e_i i E_i mają przebieg zupełnie podobny, a na większej części swej długości pokrywają się wzajemnie. To też każda z nich może równie dobrze spełnić zadanie zobrazowania dokładności przyrządu, do którego należy.

Na rys. 3³⁷⁾ pokazane są dwie krzywe błędów licznika elektrodynamicznego. Krzywa I wyznacza błędy powstające skutkiem tarcia, nie wyrównane działaniem dodatkowej zwojnicy, zaś krzywa II — wyrównane działaniem tej zwojnicy i zmniejszeniem hamowania.

Na rys. 4 przedstawiona jest krzywa błędów powszechnie używanego w instalacjach wodociągowych wodomierza skrzydełkowego.

³⁷⁾ Krukowski W. l. c., pag. 104.

Krzywe błędów E_i są przerywane, zaś krzywe e_i — ciągle. Z rysunków tych widać, że krzywe błędów E_i zupełnie podobnie charakteryzują te przyrządy, jak krzywe e_i . W obszarze, w którym bezwzględne wartości błędów e_i nie przekraczają 2÷3%, krzywe e_i i E_i (wykonane w skali, w której się zwykle je rysuje) wręcz pokrywają się nawzajem; na obszarze pozostałym przebiegają jedna tuż obok drugiej.



Rys. 4. Krzywe I oraz II przedstawiają błędy E_i i e_i wodomierza skrzydełkowego wielostrumieniowego mokrego „Protos” o średnicy nominalnej 13 mm (przepuszczalność nominalna 3 s/h) przy pochyleniu płytki regulacyjnej w stosunku do poziomu o kąt 0° (krzywa I) i o 30° (krzywa II).

krzywe e_i wzięte zostały z rozprawy A. Deakert'a pt. „Zeitgemasse Technik im Wassermesserbau” (Gas- u. Wasserfach r. 1928, Nr 52).

Pożytek uzgodnienia postaci wzoru na poprawkę i błąd wskazań niewątpliwie byłby już dostatecznym argumentem dla zastąpienia w praktyce metrologicznej błędów e_i przez E_i . Rzecz przedstawia się jeszcze bardziej na korzyść błędów E_i , kiedy chodzi o uchybienia większe, jakie spotykamy w przyrządach używanych. W praktyce mamy do czynienia z takimi błędami przy ekspertyzach, stanowiących podstawę do sporów prawnych. W tych przypadkach, kiedy bezwzględne wartości błędów

e_i dochodzą do 20% i więcej, nie można już mówić, że krzywe e_i i E_i jednakowo charakteryzują narzędzia miernicze. Lecz wtedy wartość praktyczną posiada wyłącznie błąd E_i lub, co na jedno wychodzi, poprawka³⁸⁾.

W istocie, rozstrzygnięcie sporu, którego podłożem są błędne wskazania narzędzia mierniczego, wyraża się obowiązkiem zwrotu nadpłaconej kwoty. Część uiszczonej opłaty (za gaz, wodę, energię elektryczną), podlegająca zwrotowi przez zakład użyteczności publicznej, jest równa właśnie błędowi E_i . Jeżeli np. licznik wskazywał przez pewien czas o 8% swoich wskazań za dużo, to elektrownia ma zwrócić po 8 groszy za każdego złotego wpłaconego za ten okres. Natomiast, wiedząc tylko, że np. gazomierz wskazywał o 22% za dużo w stosunku do wskazań poprawnych, moglibyśmy część kwoty wpłaconej, podlegającej zwrotowi, ustalić dopiero następującym rachunkiem:

$$\frac{22 \cdot 100}{100 + 22} = 18.0\%$$

Rozważania te prowadzą do następujących wniosków: w przyrządach o nieograniczonym obszarze mierniczym dla błędów niewielkich metody błędu e_i i błędu E_i dają praktycznie wyniki nie różniące się od siebie³⁹⁾. Można by twierdzić, że obie metody są pod względem dogodności równouprawnione, gdyby metoda błędu e_i dawała równie łatwe, jak metoda błędu E_i , przejście do poprawki, — pojęcia niezmiernie ważnego dla ogółu narzędzi mierniczych. Tym bardziej przy ekspertyzach w sprawach spornych należy przełożyć metodę błędu E_i (albo poprawki)⁴⁰⁾. Wobec tego uważałbym za najbardziej pożądane,

³⁸⁾ Bureau of Standards, Circular Nr. 309. Gas-measuring instruments, 1926, pag. 100. Metoda określania poprawki, odniesionej do wskazania gazomierza, „wymaga mniej wysiłku, jest bardziej zrozumiała i daje mniej okazji do nieporozumień u konsumentów” (niż metoda błędu, odniesionego do wskazania poprawnego).

³⁹⁾ Słuszność tego zdania najlepiej potwierdza okoliczność, że „Recommendations” l. c. podają dla współczynnika poprawki tj. dla stosunku I_c i I_n , wzór: $I_c : I_n = 1 - e_i$; utożsamiając, jak to się łatwo można przekonać, e_i i E_i , gdyż w istocie $I_c : I_n = 1 - E_i$. Natomiast Krukowski l. c. pag. 397 i „Regeln f. El.-Zähler” VDE 0516. 1932, pag. 3 podają ten współczynnik w postaci poprawnej: $I_c : I_n = 1 : (e_i + 1) = 1 - E_i$.

⁴⁰⁾ Uwzględniając powyższe, polskie przepisy o uchybieniach obiegowych, które mają właśnie zastosowanie przy ekspertyzach w sprawach spornych, konsekwentnie odnoszą uchybienia obiegowe do wskazań nominalnych (por. Przep. Obow. w Miernictwie r. 1933, Nr 1002, poz. 2,004/1, rozdziały: wodomierze, gazomierze, liczniki en. elektr.).

jako leżące w interesie racjonalizacji pracy, zupełne poniechanie korzystania z pojęcia błędu e_i w teorii narzędzi mierniczych.

Gdy mamy do czynienia z narzędziami o ograniczonym obszarze mierniczym i pragniemy osiągnąć wyższą dokładność pomiaru niż ta, na którą rozporządzane narzędzie pozwala, to znajomość poprawki względnej, a tym bardziej błędu względnego, jest bezużyteczna. W tych bowiem przypadkach bezwzględna poprawka (lub błąd) nie rośnie bynajmniej proporcjonalnie do wskazań narzędzia, nie możemy więc, znając poprawkę, określić z równania $I_c = I_n(1 + \Delta)$ poprawnego wskazania dla dowolnego nominalnego⁴¹⁾. Przeciwnie, musimy empirycznie znaleźć poprawkę dla każdego wskazania, a przynajmniej dla wielu z nich, równomiernie na podziałce rozmieszczonych, obliczając ją dla pozostałych przez interpolację. Oczywiście, że wobec tego wartość posiada tylko poprawka bezwzględna, określana równaniem (1).

Błąd e_i ma więc bardzo ograniczone zastosowanie, a tam, gdzie jest stosowany, jako środek badania, może być bez uszczerbku zastąpiony przez błąd E_i . Błąd E_i ma tę zaletę, że jest równy co do wartości poprawce. Znajomość błędu E_i jest więc znajomością poprawki i odwrotnie, bez żadnej pracy rachunkowej.

Postulatem racjonalizacji pracy jest usuwanie tych pojęć i określeń, których stosowanie, oparte wyłącznie na zwyczaju, przysparza komplikacji (w danym przypadku rachunkowych), których można uniknąć. Tendencja ta w danym razie jest tym bardziej uzasadniona, ile że kwestionowane pojęcie ogranicza się do niewielkiej części narzędzi mierniczych i bez żadnej szkody może być zastąpione przez inne, bardziej spójnie i harmonijnie związane z całokształtem teorii. Z tego punktu widzenia usunięcie z metrologii pojęcia błędu e_i i zastąpienie go przez błąd E_i wydawałoby się bardzo pożądane.

⁴¹⁾ Jeżeli inaczej traktujemy przepływomierze, to tylko dlatego, że to są narzędzia mało dokładne, a dla takich narzędzi można przyjąć, że poprawka bezwzględna rośnie proporcjonalnie do wskazań¹⁵⁾. Natomiast w narzędziach o obszarze ograniczonym potrzeba uwzględniania poprawki narzędzia przy pomiarze zachodzi tylko właśnie wtedy, gdy samo narzędzie już jest wysokiej dokładności. W narzędziach małej dokładności łatwo jest osiągnąć ten jej stopień, który potrzebny jest dla rodzaju zamierzonych pomiarów. Natomiast nie można zbudować narzędzia wysokiej dokładności tak, aby we wskazaniach jego nie było można wykryć błędów. Sztuka mierzenia stoi wyżej niż technika konstrukcji narzędzi mierniczych.