DOKŁADNOŚĆ PRZY POMIARACH FIZYCZNYCH I TECHNICZNYCH W SZCZEGÓLNOŚCI ELEKTROTECHNICZNYCH.[1])

Dr. inż. W. Krukowski,
Profesor Politechniki Lwowskiej.

Obsah. Chybné rozumění důkladnosti měření, setkavâné v mnohých vedeckých publikacích, sklânilo autora ke zkoušce vysvětlení této otázky. Autor představuje účelnost rozdílu mezi pojmem opravy a chyby, pak nezbytnost uplné zdefiňovaných známenek pro ně, a doplňuje vyvod řádou příkladů z různých oboru vědy a techniky. Pak ukazuje autor, že většinou není potřeby elíminovati chyby náhodilé oproti významu chyb systematických a představuje to na příkladech. Dále projednává přesnost určení vzorců podstatných jednotek. Konečně charakterisuje důkladnosti, jež je možno dodržeti v přesných a technických měřeních různými přístroji a metodami, zvlášť přístroji ručičkovými Referat končí upozorněním na tendence k'příliš důkladnému měření, kde podmínky toho nevyžadují neb nedovolují na jeho provedení, a poukazáním na praktické následky.

Streszczenie. Błędne pojmowanie dokładności pomiaru, spotykane w wielu publikacjach naukowych, skłoniło autora do podjęcia próby wyjaśnienia tej kwestji. Autor wykazuje celowość odróżniania pojęć poprawki i błędu oraz konieczność przypisania im zupełnie określonych znaków; wywód jest uzupełniony szeregiem przykładów, zaczerpniętych z różnych dziedzin nauki i techniki. Następnie wskazuje autor na brak w większości wypadków potrzeby eliminowania błędów przypadkowych, podnosząc znaczenie błędów systematycznych, i ilustruje to na przykładach. W dalszym ciągu przechodzi do omówienia dokładności ustalenia wzorców jednostek podstawowych. W końcu charakteryzuje dokładności, które można uzyskać w pomiarach precyzyjnych i technicznych różnemi przyrządami i metodami pomiarowemi, omawiając szerzej przyrządy wskazówkowe. Na zakończenie przestrzega przed sileniem się na zbyt dokładne pomiary tam, gdzie warunki nie wymagają tego lub nie pozwalają na ich wykonanie, oraz wskazuje na skutki, wynikające stąd w praktyce.

Najważniejszem podstawowem zagadnieniem przy wykonywaniu wszelkiego rodzaju pomiarów jak również przy obliczaniu i podawaniu ich rezultatów jest należyte uwzględnienie dokładności. Praktyka wykazuje jednak, że we wszystkich dziedzinach nauki i techniki popełnia się pod tym względem więcej błędów, niżby się tego należało spodziewać[2]). Pochodzi to przedewszystkiem stąd, że prawidłowe wykonanie pomiarów wogóle, a należyte ujęcie kwestji dokładności w szczególności wymagają nie tylko zaznajomienia się z teoretycznemi podstawami odnośnej gałęzi miernictwa, lecz przedewszystkiem dużej praktyki pomiarowej i dostatecznie krytycznego zmysłu. Warunkom tym, znaczenie których jest często niedoceniane, odpowiada jednak tylko stosunkowo mała część osób, wykonujących pomiary. Rezultatem tego jest ogłaszanie prac, które z punktu widzenia naukowego są zupełnie bezwartościowe. Ze względu na powyższe referat niniejszy nie ma i nie może obejmować całokształtu zagadnienia dokładności przy pomiarach, lecz ma na celu wyłącznie poruszenie niektórych kwestyj, które autorowi wydają się godnemi wyświetlenia ze względu na ich duże praktyczne znaczenie i na nienależyte traktowanie ich w literaturze.

Wielkością, charakteryzującą dokładność każdego pomiaru albo przyrządu pomiarowego lub metody pomiarowej, jest wielkość uchybienia czyli błędu[3]): im mniejszy jest błąd, tem

[1]) Treść niniejszego referatu pokrywa się częściowo z treścią odczytu, wygłoszonego przez autora na posiedzeniu Lwowskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego w dniu 23 lutego 1933 roku.

[2]) W wysokim stopniu daje się to zauważyć w naukowych publikacjach medycznych. Patrz w tej sprawie artykuł H. Wasilkowska-Krukowska i W. Krukowski „Über die Genauikeit bei der Durchführung und Auswertung medizinischer Untersuchungen", Klinische Wochenschrift 1932 p. 646 i 690.

[3]) W niniejszej pracy słowa „uchybienie" i „błąd" są użyte jako synonimy. Należałoby się może jeszcze nad tem zastanowić, czy każdemu z tych słów nie nadać odrębnego znaczenia. Główny Urząd Miar definjuje uchybienie jako bezwzględną wartość błędu (Dekret o Miarach z dn. 8 lutego 1919 r. Dz. Ustaw Rp. 1928 poz. 661) i wszystkie dopuszczalne błędy przyrządów pomiarowych są podawane jako uchybienia, rozumiane w tym sensie. W niektórych dziedzinach techniki, w szczególności w technice liczników energji elektrycznej i w technice transformatorów miernicziych, jest naogół jednak celowe, a w wielu wypadkach nawet konieczne uwzględnienie nie tylko bezwzględnej wartości błędu t. z. uchybienia w sensie tej definicji, lecz i uwzględnienie znaku błędu, gdyż tylko wtedy można naprzykład osądzić, czy dany przyrząd jest prawidłowo wyregulowany, lub wyregulować należycie inne przyrządy, należące do zespołu pomiarowego.

większa jest dokładność, i odwrotnie. W tem leży pewna niekonsekwencja, która jednak nie nastręcza większych trudności, i dlatego niema powodu szukania innych metod dla wyrażania dokładności.

O ile wielkość błędu ma służyć tylko za miarę dokładności, to wystarcza podanie bezwzględnej wartości błędu t. zn. niepodawanie jego znaku. Podanie błędu ze znakiem, w związku z podaniem ostatecznego rezultatu jakiegoś pomiaru, wogóle nie jest możliwe, gdyż w najlepszym razie możliwe jest tylko podanie bezwzględnej wartości prawdopodobnego błędu. Gdyby błąd rezultatu był rzeczywiście znany, to mógłby być uwzględniony przy obliczeniu rezultatu. W wielu wypadkach błąd poszczególnych pomiarów jest jednak z mniejszą lub większą dokładnością znany i może być uwzględniony przy obliczeniu ostatecznego rezultatu pomiaru. Nato, żeby poprawkę taką wprowadzić, wielkość bezwzględna i znak uchybienia względnie poprawki powinny być zupełnie jednoznacznie ustalone.

Zdawałoby się, że przy obecnym już bardzo wysokim stanie techniki pomiarowej nie powinno być pod tym względem żadnych wątpliwości. Bliższe zbadanie tej sprawy wykazuje jednak, że nie jest ona dotychczas dostatecznie wyjaśniona. W literaturze naukowej i technicznej znajdujemy szereg niejasności i rozbieżności, które powodują nieporozumienia i nieprawidłowe uwzględnianie uchybień i poprawek. Z tego powodu autor uważa przedewszystkiem za konieczne wyjaśnienie tej kwestji.

Jeśli oznaczymy prawidłową, poprawną, czyli właściwą wartość jakiejkolwiek wielkości przez P, a wartość tej samej wielkości, obarczoną jakimś błędem, przez M (wartość mierzona), to poprawką albo korekcją jest taka wielkość k, wyrażona w tych samych jednostkach (lub conajmniej jednostkach tego samego wymiaru), jak P i M, przez dodanie której do wielkości M otrzymujemy wielkość P, czyli:

$$P = M + k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1a)$$

lub

$$k = P - M \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1b)$$

Taka definicja „bezwzględnej" poprawki wydaje się jedynie prawidłową i jest ogólnie przyjętą. W poszczególnych przypadkach nastręczają się tylko pewne wątpliwości co do tego, jaką wielkość należy uważać za wielkość poprawną P, a jaką za wielkość mierzoną M.

Zupełnie określona definicja błędu jest praktycznie może nieco mniej ważna, niż definicja poprawki, niemniej jednak jest nader pożądana. Definicja błędu, przynajmniej pod względem jego znaku, jest poniekąd dowolną, wydaje się jednak, że logicznem jest nadanie uchybieniu odwrotnego znaku, niż ma poprawka, czyli definicja bezwzględnego błędu, który oznaczymy przez δ, jest ta, że błąd się otrzymuje przez pomnożenie poprawki przez — 1, to znaczy, że

$$\delta = -k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2a)$$

albo

$$\delta = M - P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2b)$$

Okazuje się jednak, że w miarodajnej literaturze z dziedziny pomiarów fizycznych, a nawet metrologji [4]), uchybienie często jest definjowane inaczej, niż to wynika z równań (2), t. z. w ten sposób, że wielkość uchybienia jest $P - M$, z czegoby wynikało, że uchybienie jest wielkością identyczną z poprawką w sensie wyżej przytoczonej definicji i równań (1). Tego rodzaju odmienną definicję wielkości błędu znajdujemy naprzykład w tak miarodajnych dziełach z dziedziny pomiarów fizycznych, jak B. Weinstein „Handbuch der physikalischen Maassbestimmungen" Berlin 1886 (vol. I. p. 15) i F. Kohlrausch „Lehrbuch der praktischen Physik", 16 wyd. Berlin 1930 (p. 1). W zagadnieniach rozpatrywanych przez tych autorów znak uchybienia jest rzeczą obojętną, gdyż traktując dalej zagadnienie błędów średnich, prawdopodobnych, wyrównanie błędów według metody najmniejszych kwadratów i t. p., oczywiście dochodzą do tych samych rezultatów niezależnie od znaków, które mają uchybienia według przyjętej przez nich definicji. Jednakowoż w wypadkach, w których obok uchybienia występuje poprawka, tę odmienną definicję błędu należy uznać za nieprawidłową, co wynika zresztą z tego, że zasada, iż poprawka ma odwrotny znak niż uchybienie, jest zdaje się przez wszystkich poważnych autorów uznana za prawidłową. Wyraźnie mówi o tem np. tak miarodajny w dziedzinie metrologji K. Scheel w swojej znanej książce „Grundlagen der praktischen Metronomie" (Braunschweig 1911) [5]). Z drugiej strony na tem samem miejscu (p. 26) podkreśla Scheel wyraźnie, że kwestja znaku uchybienia nastręcza częstokroć trudności, pisząc co następuje: „Ta zmiana znaku uchybienia doprowadzała bardzo często do mylnych rozważań. Dlatego przyzwyczajono się do unikania pojęcia uchybienia, stosując zamiast niego pojęcie poprawki. Poprawka jest zawsze określona jako wielkość, którą trzeba dodać algebraicznie do wartości nominalnej, aby otrzymać wartość poprawną" [6]). Pogląd ten wyraża Scheel w związku z kwestją znaków uchybienia i poprawki w przypadku wzorców długości. Przytoczone niżej przykłady wykazują jednak, że trudności, na jakie napotykają metrolodzy, wynikają jedynie tylko z tego, że w poszczególnych przypadkach nie zostaje dostatecznie jasno i jednoznacznie ustalone, jaka wielkość została przyjęta za wielkość poprawną P, a jaka za wielkość mierzoną M.

Bezwzględne uchybienie δ, o którem była dotychczas mowa, charakteryzuje dokładność właściwie tylko wtedy, gdy jednocześnie jest znaną wartość wielkości, do której uchybienie się odnosi. Właściwą wielkością, charakteryzującą dokład-

---

[4]) Zadaniem metrologji są przedewszystkiem dokładne porównania wzorców długości i masy.

[5]) Odnośne zdanie brzmi w oryginale (p. 27), jak następuje: „Korrektion und Fehler unterscheiden sich also um den Faktor — 1".

[6]) Oryginalny tekst brzmi: „Dieser Vorzeichenwechsel des Fehlers hat sehr oft zu falschen Überlegungen geführt. Man hat sich deshalb daran gewöhnt, den Begriff des Fehlers ganz zu beseitigen, indem man statt dessen den Begriff der Korrektion gebraucht. Korrektion wird ganz allgemein als der Wert definiert, welchen man algebraisch zu dem Nominalwert addieren muss, um den wahren Wert zu erhalten".

ność, jest uchybienie względne, t. zn. wielkość uchybienia δ przypadająca na jednostkę wielkości mierzonej. Jeżeli oznaczymy uchybienie względne przez Δ, to ma ono wartość:

$$\Delta = \frac{\delta}{P} = \frac{M - P}{P} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Zazwyczaj uchybienie względne Δ wyraża się w setnych albo tysięcznych, czyli, co na to samo wychodzi, w procentach albo w promilach, a przy pomiarach najwyższej precyzji w dziesięciotysięcznych, stutysięcznych i t. d. Δ w procentach względnie w promilach otrzymuje się przez pomnożenie wartości obliczonej na podstawie równania (3) przez 100, względnie 1000. O ile dalej zajdzie potrzeba specjalnego odróżnienia uchybienia względnego w procentach, to wielkość ta będzie oznaczona indeksem 100. Bliższe omawianie znaczenia uchybień względnych wydaje się zbyteczne, gdyż kwestja ta nie nastręcza fachowcom naogół mówiąc żadnej wątpliwości. Warto jednak podkreślić, że uchybienie Δ ma ten sam znak, co uchybienie bezwzględne δ, jak równie i to, że Δ odnosi się do wielkości poprawnej P, a nie do wielkości mierzonej M. Nieuwzględnienie tego doprowadza, ściśle mówiąc, do odmiennych wartości bezwzględnych uchybienia względnego. O ile uchybienie jest małe, to różnice są coprawda nieznaczne. Odniesienie uchybienia względnego do wartości M powinno być zasadniczo uważane za zmianę w pojmowaniu, co jest wielkością P i co wielkością M. Taka zamiana roli wielkości pociąga za sobą zmianę znaku uchybienia bezwzględnego δ, którego wartość bezwzględna oczywiście nie ulega zmianie, i zmianę znaku i wartości bezwzględnej uchybienia względnego Δ.

Jeżeli są dane dwie wielkości A i B, z których zależnie od obranego punktu widzenia raz wielkość A jest uważana za poprawną, a drugi raz B, to oznaczając uchybienia, które się otrzymuje w pierwszym przypadku, t. zn. w założeniu, że $P = A$ indeksem A, w drugim wypadku ($P = B$)—indeksem B, otrzymujemy:

$$\delta_A = B - A \text{ i } \delta_B = A - B = -\delta_A$$

$$\Delta_A = \frac{\delta_A}{A} = \frac{B - A}{A} \text{ i } \Delta_B = \frac{\Delta_B}{B} = \frac{A - B}{B} = -\frac{\delta_A}{B} \quad (4)$$

Uwzględniając, że $B = A + \delta_A$ i $\delta_A = \Delta_A \, . \, A$ otrzymujemy:

$$\Delta_B = -\frac{\delta_A}{A + \delta_A} = -\frac{\Delta_A \, . \, A}{A + \Delta_A \, . \, A} = -\frac{\Delta_A}{1 + \Delta_A} \quad (5)$$

Ze względu na to, że Δ_B ma zawsze odwrotny znak, niż Δ_A, różnica bezwzględnych wartości tych uchybień równa się sumie ich wartości i ma znak tej wielkości, której bezwzględna wartość jest większa. Ta suma wynosi

$$\Delta_A + \Delta_B = \Delta_A - \frac{\Delta_A}{1 + \Delta_A} = \frac{\Delta_A^2}{1 + \Delta_A}$$

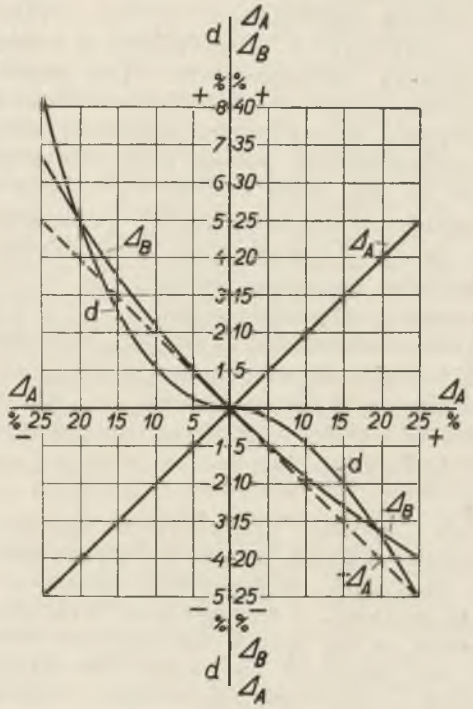
Jeżeli wyrażamy uchybienia względne w %, to suma ich wynosi:

$$\Delta_{A,100} + \Delta_{B,100} = \Delta_A \, . \, 100 + \Delta_B \, . \, 100 = \frac{\Delta_A^2}{1 + \Delta_A} \, . \, 100 =$$

$$= \frac{\left(\frac{\Delta_{A,100}}{100}\right)^2}{1 + \frac{\Delta_{A,100}}{100}} \, . \, 100 = \frac{\Delta^2_{A,100}}{100 + \Delta_{A,100}} .$$

Krzywe rys. 1 przedstawiają przebieg wielkości $\Delta_{A,100}$, $\Delta_{B,100}$, $|\Delta_{B,100}| - |\Delta_{A,100}|$ jako funkcje $\Delta_{A,100}$.

Pożytecznem będzie jeszcze może nadmienić, że jeżeli są dane jakieś dwie wielkości α i β, które



Rys. 1.

są odwrotnościami wielkości A i B, t. zn. $\alpha = 1/A$ i $\beta = 1/B$, to z tych wielkości otrzymujemy uchybienia względne Δ_A i Δ_B z następujących wzorów:

$$\Delta_A = \frac{\alpha - \beta}{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6a)$$

$$\Delta_B = \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6b)$$

Ze wzorów powyższych robi się naprzykład użytek przy obliczaniu uchybień liczników, jeżeli się liczy zapomocą czasu, odpowiadającego określonej ilości obrotów licznika, albo zapomocą „stałej", wyrażonej jako ilość jednostek energji przypadających na jeden obrót licznika. Warto jeszcze nadmienić, że przy obliczaniu uchybienia względnego można we wzorach (3) względnie (4) i (6) zamiast wielkości P i M, A i B względnie α i β wstawić inne wielkości do nich proporcjonalne.

Uchybienia względne, wyrażone w procentach, odgrywają szczególną rolę w transformatorach mierniczych i licznikach energji elektrycznej.

Przechodzimy teraz do rozpatrzenia kilku przykładów, wyjaśniających praktyczne znaczenie powyższych wzorów i rozważań. W przykładach tych będziemy oznaczać wielkości poprawne indeksem P, wielkości mierzone, względnie obarczone błędem, indeksem M.

Przykład 1. *Określenie wartości wielko-*

ści fizycznych. Przypuśćmy, że ma być określona jakaś wielkość fizyczna, np. masa jakiegoś ciała. Jeżeli rzeczywista, t. zn. poprawna wartość tej masy jest m_P, a rezultat pomiaru (ważenia) dał wartość m_M, to z tego wynika na podstawie równania (2b), że bezwzględne uchybienie pomiaru jest $\delta = m_M - m_P$. Jeżeli $m_M > m_P$, to δ jest dodatnie, a poprawka ujemna i odwrotnie. Takie i podobne przykłady nie nastręczają w praktyce naogół żadnych wątpliwości.

P r z y k ł a d 2. *Przyrządy ze skalami, w szczególności wskazówkowe.* Ten przykład jest szczególnie ważny w praktyce elektrotechnicznej. Przypuśćmy, że wykonano zapomocą wskazówkowego amperomierza pomiar natężenia prądu i odczytano na jego skali wartość $I_M = 51$ A; w rzeczywistości wynosiło mierzone natężenie prądu $I_P = 50$ A. Z tego wynika, że w danym wypadku poprawka rezultatu pomiaru jest $k = -1$ A, a tem samem uchybienie pomiaru $\delta = +1$ A. Ogólnie: jeżeli oznaczymy przez α_P wskazanie przyrządu, któreby się otrzymało, gdyby przyrząd nie był obarczony żadnym błędem, t. zn. poprawne wskazanie, a przez α_M rzeczywiste wskazanie przyrządu, to korekcja jest $k = \alpha_P - \alpha_M$, a uchybienie $\delta = \alpha_M - \alpha_P$.

Ten i podobne przykłady nie nasuwają zdaje się również żadnych wątpliwości; poprawki i uchybienia pomiarów, wykonanych zapomocą przyrządów ze skalami, w szczególności wskazówkowych, są ogólnie w ten sposób definjowane. Niezupełnie ścisłe jest coprawda nazywanie tak definjowanych poprawek i uchybień poprawkami i uchybieniami samego przyrządu, ale ten ogólnie przyjęty sposób wyrażania się jest krótki i wygodny, wobec czego jest zbyteczne wprowadzanie pod tym względem jakichś zmian.

Jeżeli poprawka przyrządu jest znana, to można przy jego pomocy nastawić określoną wartość tej wielkości, do mierzenia której przyrząd jest przeznaczony. Tak np. otrzymuje się przy zastosowaniu przyjętego wyżej amperomierza natężenie prądu 50 A, jeżeli się przyrząd nastawi na 51 A. Z tego wynika, że w danym wypadku k o r e k c j a n a s t a w i e n i a wynosi + 1 A. Jeżeli oznaczymy ogólnie korekcję nastawienia, którą należy uważać za właściwą poprawkę przyrządu, przez k_n, to ma ona tę samą wartość bezwzględną, ale odwrotny znak, niż poprzednio ustalona poprawka k, czyli $k_n = -k = \delta$, t. zn., że k_n jest wielkością identyczną z uchybieniem pomiaru. Mamy tu więc przykład zmiany punktu widzenia, o której była mowa wyżej. Gdybyśmy operowali uchybieniami względnemi, to musielibyśmy, ściśle biorąc, przy zamianie punktu widzenia nietylko zmienić znak, ale i przeliczyć wartości bezwzględne według wzoru (5).

P r z y k ł a d 3. *Liczniki energji elektrycznej.* W licznikach energji elektrycznej mają naogół znaczenie praktyczne tylko uchybienia względne, wyrażane zazwyczaj w procentach wielkości poprawnej, t. zn. rzeczywistego zużycia energji. Jeżeli oznaczymy rzeczywiste zużycie energji przez A_P, a odpowiednie wskazania licznika (różnica dwóch odczytów liczydła) przez A_M, to uchybienie w procentach wynosi:

$$\Delta_{100} = \frac{A_M - A_P}{A_P} \cdot 100,$$

natomiast poprawka K_{100} w procentach

$$K_{100} = \frac{A_P - A_M}{A_M} \cdot 100.$$

Operowanie poprawką przy licznikach jest niewygodne i nieprzyjęte; zamiast niej używa się mnożnika korekcyjnego F, który się oblicza jak następuje:

$$F = \frac{A_P}{A_M} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta_{100}}{100}}$$

Większe praktyczne znaczenie w technice licznikowej mają właściwie tylko uchybienia przy zupełnie określonych rodzajach obciążenia [7]).

W technice licznikowej przyjmuje się zatem jako uchybienie i poprawkę wzgl. mnożnik korekcyjny, podobnie jak w przyrządach ze skalą, wielkości odnoszące się do wielkości, którą licznik ma wskazywać względnie wskazuje, a nie właściwą poprawkę samego przyrządu pomiarowego. Korekcja nastawienia odgrywa rolę tylko przy regulacji liczników, pojęcie to nie jest jednak wprowadzone do techniki licznikowej.

P r z y k ł a d 4. *Transformatory miernicze.* Przypuśćmy, że mamy transformator prądowy, którego poprawna (nominalna) przekładnia jest $p_P = I_{1,P} / I_{2,P}$; w rzeczywistości transformator ma przekładnię $p_M = I_{1,M} / I_{2,M}$. W takim razie (względne) u c h y b i e n i e p r z e k ł a d n i (wyrażane normalnie w %) jest $\Delta = \frac{p_M - p_P}{p_P}$, czyli zakładając jakąś określoną wartość I_1 pierwotnego natężenia prądu, otrzymamy wzór:

$$\Delta_p = \frac{p_M - p_P}{p_P} = \frac{\frac{I_1}{I_{2M}} - \frac{I_1}{I_{2P}}}{\frac{I_1}{I_{2P}}} = \frac{I_{2,P} - I_{2,M}}{I_{2,M}}.$$

Jeżeli naprzykład nominalna przekładnia transformatora jest $p_P = 300/5 = 60$, a rzeczywista $p_M = 300/4{,}925 = 60{,}91$, to uchybienie przekładni wynosi:

$$\Delta_p = \frac{60{,}91 - 60{,}00}{60{,}00} = \frac{5{,}000 - 4{,}925}{4{,}925} = +0{,}0152 \ (= +1{,}52\%).$$

Uchybienie przekładni tego transformatora jest dodatnie, natomiast przyrząd przyłączony do niego, np. amperomierz, wskazuje za mało. Tego rodzaju ustalenie uchybienia transformatora prądowego jest niewygodne i dlatego weszło w zwyczaj używanie pojęcia u c h y b i e n i a p r ą d o w e g o Δ_I zamiast uchybienia przekładni. Uchybienie prądowe jest to (względne) uchybienie (normalnie wyrażane w %) prądu wtórnego względem jego wartości poprawnej, którąby się otrzymało przy

[7]) Zestawienie wzorów odnoszących się do uchybień liczników, patrz np. K r u k o w s k i „Grunzüge der Zählertechnik" Berlin 1930, str. 395.

danym prądzie pierwotnym przy poprawnej przekładni. To uchybienie wyraża się więc wzorem:

$$\Delta_I = \frac{I_{2,M} - I_{2,P}}{I_{2,P}}.$$

Dla transformatora, który wyżej rozpatrywaliśmy, uchybienie prądowe wynosi:

$$\Delta_I = \frac{4{,}925 - 5{,}000}{5{,}000} = -0{,}0150 \ (= -1{,}50\%).$$

Powyższe wzory i przykład liczbowy pokazują wyraźnie, że przejście z uchybienia przekładni Δ_P na uchybienie prądowe Δ_I jest zmianą punktu widzenia co do tego, co jest wielkością P, a co wielkością M. Nieścisłe więc jest założenie, które często jest robione, że uchybienie przekładni i uchybienie prądowe różnią się tylko znakiem, a ich wielkość bezwzględna jest identyczna. Z takiego mylnego założenia często już wynikały nieporozumienia, wystarczy chociażby nadmienić, że w Międzynarodowych przepisach o transformatorach mierniczych [8]) znajdują się również pewne niedokładności.

Wszystko, co było powiedziane wyżej o transformatorach prądowych, dotyczy odpowiednio transformatorów napięciowych, w których również należy ściśle odróżniać pojęcie uchybienia przekładni Δ_p od uchybienia napięciowego Δ_u

P r z y k ł a d 5. *Wzorce* Uchybienia i poprawki wzorców mają pierwszorzędne znaczenie w metrologii i właśnie tu nastręczają się trudności, o których mówi Scheel (patrz wyżej).

Przypuśćmy, że mamy do czynienia z kreskowym wzorcem metra. Gdyby wzorzec ten był zupełnie dokładny, to odległość między dwoma określonemi kreskami wynosiłaby dokładnie 1 m. Przypuśćmy, że w rzeczywistości odległość ta jest o 10 mikronów większa od 1 m, czyli długość wzorca wynosi 1 m + 10 μ. Stosując wyżej przyjętą definicję przychodzimy do wniosku, że uchybienie wzorca wynosi + 10 μ a tem samem korekcja — 10 μ. Gdybyśmy chcieli doprowadzić wzorzec do wartości poprawnej, to musielibyśmy zmniejszyć odległość między kreskami o 10 μ. Ogólnie należy oznaczyć poprawną wielkość wzorca, t. zn. jego wartość nominalną przez L_P, wielkość rzeczywistą przez L_M, z czego wynika uchybienie wzorca $\delta = L_M - L_P$, a korekcja $k = L_P - L_M$. Okazuje się jednak, że metrolodzy dochodzą do odwrotnego znaku korekcji, t. zn. podają, że korekcja wzorca długości, który jest dłuższy, niż powinien być, jest dodatnią; w naszym przykładzie metrolodzy uważaliby, że korekcja wzorca wynosi + 10 μ.

Z tego wynika, że metrolodzy przyjmują jako wielkość L_P nie wartość nominalną, lecz wartość rzeczywistą. Bliższe zastanowienie się nad tą sprzecznością wykazuje, że metrolodzy, mówiąc o „korekcji wzorca", mają właściwie na myśli k o r e k c j ę p o m i a r u, w y k o n a n e g o z a p o m o c ą w z o r c a, co oczywiście powoduje zmianę znaku uchybienia i poprawki. Przypuśćmy, że mamy do zmierzenia odległość, która wynosi 1 m + 10 μ. W tym wypadku otrzymalibyśmy przy użyciu do pomiaru wymienionego wzorca jako niekorygowany rezultat pewną długość l_M = 1 m. Ze względu na to, że użyty do pomiaru wzorzec jest o 10 μ za długi, korekcja pomiaru wynosi rzeczywiście + 10 μ t. zn. poprawna, czyli korygowana wielkość mierzonej długości jest l_P = 1 m + 10μ. Takiemu ujęciu zagadnienia, przyjętemu w metrologji, nie można niczego zarzucić jak tylko to, że niesłusznie mówi się o korekcji wzorca, myśląc w rzeczywistości o ważniejszej faktycznie dla metrologa korekcji pomiaru, wykonanego za pomocą tego wzorca.

Przykład powyższy pokazuje wyraźnie, jak ważnem jest w poszczególnych wypadkach dokładne ustalenie, co się uważa za wielkość poprawną, a co za wielkość mierzoną. W każdym razie wydaje się niedopuszczalną zmiana punktu widzenia przy określaniu uchybienia i korekcji, jak to częstokroć robią metrolodzy. Autor niniejszego referatu sam miał sposobność przekonania się, że sposób ujęcia zagadnienia przez metrologów może doprowadzić do nieporozumień, jeżeli się go stosuje do uchybień liczników elektrycznych, co do których elektrycy właściwie nie napotykają na żadne trudności. Nie można jednak podzielić zdania S c h e e l a, że pojęcie uchybienia może być wogóle pominięte.

O ile chodzi o wzorce, które interesują w pierwszym rzędzie metrologów, przedewszystkiem o wzorce długości, to pomijając ich fabrykację, korekcja samego wzorca interesuje nas właściwie mało. Jednakowoż w niektórych innych wzorcach korekcja samego wzorca może mieć pewne praktyczne znaczenie. Przypuśćmy naprzykład, że mamy do czynienia ze wzorcem oporu o wielkości nominalnej np. 0,001 Ω i wzorzec ten jest o 0,1‰ za duży. W tym wypadku można łatwo przy pomiarze skorygować wzorzec, przyłączywszy do niego równolegle opór o wielkości około 10 Ω.

Porównując to, co zostało powiedziane o wzorcach z tem, co zostało omówione w przykładach dotyczących przyrządów ze skalami, liczników i transformatorów mierniczych, przychodzi się do wniosku, że we wszystkich przyrządach, nie wykluczając wzorców, p r z y j ę t o u w a ż a ć z a u c h y b i e n i a i p o p r a w k i p r z y r z ą d ó w — u c h y b i e n i a i p o p r a w k i p o m i a r ó w, w y k o n a n y c h z a i c h p o m o c ą [9]).

P r z y k ł a d 6. *Zegary*. Pomiar czasu zajmuje nieco odrębne miejsce w technice pomiarowej. Właściwie dokładność zegarów należałoby wyrażać podobnie, jak dokładność liczników energji elektrycznej, uchybieniem względnem. Przyjęło się jednak wyrażanie dokładności zegarów przy pomocy uchybienia bezwzględnego w sekundach, odniesionego jednak do jednej doby, t. zn. właściwie znowu przy pomocy uchybienia względnego. W nauce, przedewszystkiem w astronomji, operuje się wyłącznie poprawkami, a nie uchybieniami, przyczem odróżnia się trzy rodzaje poprawek, które zarazem charakteryzują dokładność zegarów. 1. P o p r a w k a z e g a r a jest to zgodnie z wyżej

[8]) IEC Recommendations for Instrument Transformers Publication 44.

[9]) Poruszone wyżej kwestje uchybień i korekcyj wzorców i t. p. mają być z punktu widzenia metrologicznego obszernie potraktowane w specjalnym artykule p. Inż. Z. R a u s z e r a, Dyrektora Głównego Urzędu Miar. Według informacyj, uzyskanych od p. Dyr. R a u s z e r a, ma się ten artykuł wkrótce ukazać.

podaną ogólną definicją poprawki wielkość, którą należy dodać do wskazań zegara, aby otrzymać poprawny czas. Jeżeli oznaczymy tę poprawkę znów przez k, wskazania zegara przez T_M, a poprawny czas przez T_P, to $k = T_P - T_M$. 2. Chód (czasami ruch) zegara jest zmianą korekcji w ciągu jednej doby. 3. Zmiana (dobowa) chodu, której wielkość jest właściwą miarą dobroci zegara, jest zmianą chodu w ciągu jednej doby. Z tego wynika, że chód jest pierwszą pochodną poprawki względem czasu $\frac{dk}{dt}$, a zmiana chodu drugą pochodną poprawki $\frac{d^2k}{dt^2}$.[10])

Przechodzimy teraz do następnej kwestji, mianowicie stosowania teorji błędów przy pomiarach. Kwestję tę należy uważać zasadniczo za zupełnie wyjaśnioną, praktyka jednak wykazuje, że zagadnienie to częstokroć jest ujmowane w sposób zupełnie nieodpowiedni.

Uchybienia każdego pomiaru można podzielić na kilka grup. Przeważnie odróżnia się uchybienia wielkie, uchybienia systematyczne i uchybienia przypadkowe. Uchybienia wielkie są spowodowane jakąś nieostrożnością przy odczytywaniu przyrządów pomiarowych, jakąś niespostrzeżoną większą zmianą warunków pomiaru i t. p.; rezultaty takich pomiarów nie powinny być wogóle uwzględniane, jeżeli się nie dadzą pewnie skorygować. Uchybienia systematyczne są spowodowane całym szeregiem przyczyn i powinny być w miarę możności wyeliminowane przez powtórzenie pomiarów przy odpowiednio zmienionych warunkach, przez wprowadzenie odpowiednich korekcyj i t. p. Błędy przypadkowe są to takie błędy, których przyczyny nie dają się uchwycić. Wpływ tych błędów na rezultat ostateczny pomiaru daje się jednak zredukować do minimum przez wielokrotne powtórzenie pomiaru. Najprawdopodobniejszym rezultatem pomiaru jest w najprostszym przypadku średnia arytmetyczna z poszczególnych rezultatów, obarczonych uchybieniami przypadkowemi. O ile na zasadzie pewnych przesłanek można wywnioskować, że dokładność poszczególnych rezultatów jest różna, to przy obliczaniu najprawdopodobniejszej wartości uwzględnia się jeszcze ważkość poszczególnych rezultatów. Zagadnieniu wyrównania uchybień przypadkowych, opartemu na teorji najmniejszych kwadratów Gaussa, poświęca się mniej lub więcej miejsca w każdym większym podręczniku o pomiarach fizycznych, a czasami i w podręcznikach o pomiarach technicznych. Wystarcza tu przytoczyć wymienione już wyżej podręczniki Kohlrauscha i Weinsteina. Pierwszy tom ostatniego dzieła jest całkowicie poświęcony temu zagadnieniu. Nie ulega oczywiście żadnej wątpliwości, że teorja najmniejszych kwadratów jest jedną z największych zdobyczy techniki pomiarowej; nie ulega jednak również wątpliwości, że stosowanie jej przy pomiarach technicznych nawet najwyższej precyzji jest prawie zawsze bezcelowe, a wnioski, wyciągnięte ze stosowania tej teorji, łatwo mogą dać zupełnie nieprawidłowy obraz rzeczywiście osiągniętej dokładności. Autor niniejszego referatu, zajmując się więcej niż od dwudziestu lat dokładnemi pomiarami elektrotechnicznemi, właściwie nigdy nie natrafił na przypadek, kiedy stosowanie metod wyrównania błędów, określenie błędu prawdopodobnego i t. p. byłoby potrzebne lub chociażby tylko pożądane. Prawie we wszystkich przypadkach, z któremi ma do czynienia technik, uchybienia systematyczne tak znacznie przekraczają uchybienia przypadkowe, że dokładne wyrównanie błędów przypadkowych jest zupełnie bezcelowe. Należy wyraźnie skonstatować, że zastosowanie metody najmniejszych kwadratów jest tylko tam na miejscu, gdzie błędy przypadkowe są większe, albo conajmniej tego samego rzędu co błędy systematyczne. To ma jednak miejsce tylko przy pomiarach wykonanych zapomocą nader precyzyjnych, ale w zasadzie bardzo nieskomplikowanych przyrządów pomiarowych, np. przy pomiarach geodezyjnych, astronomicznych i t. p., przy których słusznie jest stosowane wyrównanie błędów zapomocą metody najmniejszych kwadratów. Zastosowanie tej metody przy pomiarach fizycznych jest jednak na miejscu tylko przy niektórych podstawowych pomiarach, np. bardzo dokładnych określeniach mas, ciężarów, długości, kątów i niektórych innych. We wszystkich innych wypadkach błędy systematyczne są w porównaniu z błędami przypadkowemi tak wielkie, że wszelkie wyrównanie błędów przypadkowych, za wyjątkiem określenia średniej wartości jako najprawdopodobniejszego ostatecznego rezultatu, jest zupełnie zbyteczne i wprowadzające w błąd. Pomimo że znajdujemy w literaturze podkreślenie powyższego w tej lub innej formie[11]), stosuje się często wyrównanie błędów przypadkowych w zupełnie nieodpowiedniem miejscu. Tak naprzykład znajdujemy w jednym z podręczników pomiarów elektrotechnicznych mniejwięcej następujący przykład określania „dokładności" pomiaru. Wykonano 5 pomiarów oporu, którego wartość jest w wysokim stopniu zależną od wahań temperatury i którego dokładna wartość wogóle nie jest wielkością, mającą jakiekolwiek większe znaczenie praktyczne. Poszczególne pomiary dały następujące wyniki: 317,7, 317,9, 318,2, 317,7 i 318,0 Ω. Średnia wartość wynosi 317,9. Obliczony na podstawie znanych wzorów prawdopodobny błąd tej średniej wartości wynosi ± 0,0639 Ω. Na podstawie tego obliczenia ostateczny rezultat pomiaru jest podany w formie 317,9 ± 0,0639 Ω. Oczywistem jest, że w danym wypadku podawanie rezultatu w takiej formie jest nieprawidłowe. Już zaokrągle-

[10]) Mniej szczęśliwą nazwą poprawki zegara jest nazwa, używana w literaturze niemieckiej, „Stand der Uhr". Zresztą spotyka się również lepszą nazwę „Uhrkorrektion". Chód zegara nazywają Niemcy „Gang der Uhr", a zmianę chodu „Gangschwankung" albo „Gangvariation". Przytoczenie tego wydaje się pożądane, gdyż w literaturze polskiej zdaje się niema żadnej większej książki lub rozprawy z dziedziny zegarów, natomiast odnośna literatura niemiecka jest bardzo obszerna. Patrz np. H. Bock „Die Uhr" Leipzig — Berlin 1917 Teubner (zbiór „Aus Natur und Geisteswelt") i V. Niesiołowski — Gawin „Zeitmesse für laufende Zeitanzaige" Handbuch der Physik vol II, p. 169, Berlin 1926, Springer. E. Geleich „Die Uhrmacherkunst" Wien (Hartleben).

[11]) Już w dziełach twórcy teorji najmniejszych kwadratów Gaussa znajdujemy zupełnie niedwuznaczne wyjaśnienia co do tej kwestji. Patrz np. C. F. Gauss „Abhandlungen zur Methode der kleinsten Quadrate" Berlin 1887 p. 2.

nie poszczególnych rezultatów i wartości średniej na 0,1 Ω wskazuje, że obliczanie prawdopodobnego błędu wogóle, a z dokładnością 0,0001 Ω w szczególności, jest zupełnie nie na miejscu. Można było najwyżej podać, że uchybienia przypadkowe są rzędu ± 0,1 Ω, zwrócić uwagę na to, że błędy systematyczne są stosunkowo duże i spróbować określić ich przypuszczalną wielkość. Z tego samego podręcznika możnaby przytoczyć szereg podobnych przykładów.

Ale nawet w przypadku pomiarów wykonanych bardzo starannie z uwzględnieniem wszelkich korekcyj i t. p. podanie prawdopodobnego błędu może być często traktowane tylko z punktu widzenia oceny staranności wykonania pomiarów przez poszczególnych autorów, ale bynajmniej nie charakteryzuje ono faktycznie osiągniętej dokładności. Na dowód tego można naprzykład przytoczyć rezultaty tak klasycznych pomiarów, jakiemi są pomiary średniej gęstości ziemi. Jeden z autorów, Wilsing, otrzymał jako rezultat 5,579 ± 0,012, z czego możnaby wnioskować, że poprawna wartość leży w granicach od 5,567 do 5,591. Richarz i Krigar-Menzel otrzymali 5,505 ± 0,0009, z czegoby wynikało, że poprawna wielkość leży w granicach od 5,5041 do 5,5059. Wartości te nie mieszczą się w granicach wartości Wilsinga. Bardzo dokładne, przypuszczalnie najdokładniejsze dotychczas rezultaty osiągnęli Boys i Braun, którzy wykonali pomiary niezależnie od siebie i różnemi przyrządami. Autorzy ci podają zgodnie wartość 5,527, która nie mieści się w granicach żadnego z podanych wyżej rezultatów. Prawdopodobne uchybienia rezultatów Boysa i Brauna nie są autorowi niniejszego referatu znane, ale sądząc z ich zgodności, jak również na zasadzie innych danych, dotyczących dokładności metod i stosowanych przyrządów, należy rezultaty tych autorów uważać za bardzo zbliżone do wartości poprawnej.

Innym przykładem charakterystycznym w dziedziny podstawowych pomiarów najwyższej precyzji jest określenie wartości bezwzględnego ohma w jednostkach Siemensa. Z najpewniejszych znanych przed rokiem 1890 wartości wynikałoby, że dolna prawdopodobna granica wartości ohma bezwzględnego jest 1,06280, górna 1,06294 jednostek Siemensa. Na zasadzie tych rezultatów i odpowiedniego uwzględnienia jeszcze kilku dalszych rezultatów pomiarów mniejszej dokładności dochodzi Dorn w swej znanej krytycznej pracy [12]) do wniosku, że najprawdopodobniejszą wartością jest $1{,}0628_5$ i proponuje przyjęcie jako wartości zaokrąglonej 1,063. Wartość ta została na Kongresie w Chicago w r. 1893 przyjęta przy definicji międzynarodowego ohma. Późniejsze znacznie dokładniejsze pomiary, wykonane w PTR, NPL i BSt, wykazują daleko idącą zgodność i dają wartość bardzo zbliżoną do 1,06250, czyli wartość, która znów nie leży w granicach dawniejszych pomiarów [13]).

Źródła błędów systematycznych są najrozmaitsze i nie mogą być w ramach niniejszego ogólnego referatu oczywiście dokładnie omówione. Jednem ze źródeł systematycznych błędów, z którem należy się liczyć przy pomiarach najwyższej precyzji, na których znowu opierają się pomiary mniej dokładne, jest niedokładność używanych wzorców. Częstokroć nawet fachowcy nie zdają sobie dostatecznie jasno sprawy z tego, z jaką dokładnością są ustalone podstawowe wzorce i z jaką dokładnością mogą być z tego powodu w najlepszym razie wykonane pomiary najwyższej precyzji. Wobec tego jest ciekawem przynajmniej krótkie zreferowanie tej kwestji.

Najdokładniejszemi pomiarami wogóle są pomiary długości, masy i czasu, a z elektrycznych, pomiary oporu i spółczynnika samoindukcji. Względne pomiary tych wielkości mogą być wykonane naogół znacznie dokładniej, niż są ustalone odnośne wzorce podstawowe. Z tego wynika, że wykorzystanie możliwej dokładności pomiarów, ma rację bytu li tylko w związku z ustaleniem podstawowych wzorców.

Podstawowym wzorcem jednostki długości jest międzynarodowy wzorzec metra, który, jak wiadomo, jest wzorcem kreskowym, t. zn. takim, którego długość jej określona jako odległość osi dwóch określonych kresek. Wykonanie przechowywanego w Bureau International des Poids et Mesures podstawowego międzynarodowego wzorca, jak również identycznie wykonanych wzorców wtórnych tej instytucji i podstawowych wzorców narodowych nie pozwala na osiągnięcie większej dokładności przy porównaniu niż 0,2 μ, t. zn. $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ wielkości miemierzonej. Głównym powodem tego jest, że miarodajne kreski są stosunkowo szerokie i nastawienie mikroskopów kompensatora na osi kresek nie może być dokonane z większą dokładnością. Dokładność, z którą jest ustalona długość metra, jest jednak właściwie jeszcze mniejszą; wynosi ona przypuszczalnie około 0,5 μ czyli $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ wartości nominalnej. Dowodem tego jest fakt, że dwa wtórne wzorce Międzynarodowego Biura, używane przy miarodajnych pomiarach zamiast podstawowego wzorca, uległy w czasie od r. 1892 do 1901 zmianie długości mniejwięcej o 0,4 μ, i niema żadnej pewności, że i wzorzec podstawowy nie uległ podobnej zmianie. Ta niepewność faktycznej długości metra przekracza wartość, która przy obecnym stanie najprecyzyjniejszych pomiarów długości, przedewszystkiem pomiarów końcowych wzorców z płaszczyznami równoległemi (klocków Johansona), może być uznana za dopuszczalną. Z tego i z innych jeszcze powodów już obecnie długość takich wzorców bywa wymierzana wprost w długościach fali światła określonego rodzaju, przyczem normalnie przyjmuje się, że 1 m = 1 553 164,13 długości fali światła czerwonego prążka kadmu w suchem powietrzu o temperaturze 15° skali termodynamicznej i ciśnieniu słupa rtęci o wysokości 760 mm przy normalnej sile ciężkości. Jest to wartość, do której doszli przy swoich pomiarach Benoît, Fabry i Perot w r. 1907 [14]). Należy jednak przypuścić, że w rzeczywistości wartość ta powinna być nieco skorygowaną ze względu na to, że wymienieni autorzy posługiwali się wtórnemi wzorcami Biura Międzynarodowego, u których zauważono dopiero późź-

[12]) Dorn, F., Wiss. Abh. d. PTR Bd. II (1895) p. 257.

[13]) Bliższe dane dotyczące tego zagadnienia znajdują się w drugim specjalnym referacie autora, poświęconym jednostkom wielkości elektrycznych.

[14]) Benoit, Ch. Fabry et A. Perot, Compt. rend 144 (1907) p. 1082.

niej, że się nieco zmieniły. Prawdopodobna skorygowana wartość jest podana w jednej z publikacyj Dyrektora Międzynarodowego Biura Guillaume [15]), ale jest ona, jak można wnioskować z pewnych powodów, prawdopodobnie błędną; kwestja ta wymagałaby jeszcze wyjaśnienia. Obecnie są wykonywane, względnie w najbliższym czasie mają być wykonane, nowe pomiary długości metra, wyrażonej w długości fal światła. Przypuszczalnie wcześniej lub później zostanie definicja metra jako długości wzorca międzynarodowego zarzucona i ustalona jako ilość fal światła określonego rodzaju.

Ciekawem jest jeszcze stwierdzenie, że największa dokładność technicznych pomiarów długości, mianowicie pomiarów długości klocków Johansona, może wynosić mniejwięcej $0{,}1 \cdot 10^{-6}$ przy stosunkowo długich wzorcach: przy 100 mm naprzykład osiąga się dokładność mniejwięcej 0.01 μ. Jest to więc dokładność większa niż ta, z którą mogą być porównywane miarodajne wzorce metra i mniejwięcej pięciokrotnie większa, niż dokładność, z którą można dziś uważać metr za ustalony.

P o r ó w n a n i e m a s zapomocą równoramiennej wagi może być wykonane nader dokładnie. Największą dokładnością osiągalną przy porównaniu dwóch wzorców kilogramowych jest mniejwięcej 0,001 mg, czyli $1 \cdot 10^{-9}$ wartości porównywanych. Tej dokładności pomiaru nie można jednak praktycznie wykorzystać, ponieważ masa kilograma międzynarodowego nie może być uważana za ustaloną z tą wysoką dokładnością. Można przyjąć, że znamy tę masę „tylko" z dokładnością 0,01 mg, t. zn. $1 \cdot 10^{-8}$. Przyczyną tego jest pewna zmienność masy wzorca, spowodowana przypuszczalnie nieco zmiennemi warstwami wilgoci. Przez jakiś czas miało się nadzieję, że można otrzymać dokładniejsze wyniki, używając wag próżniowych. Okazało się jednak, że ważenie w próżni daje nawet mniej pewne wyniki niż ważenie w powietrzu, i to przypuszczalnie dlatego, że w próżni warstwy wilgoci, osiadające na wzorcach, zmieniają się w znacznym i zupełnie nieokreślonym stopniu. Zdaje się jednak, że dotychczas nie zaszła nigdy i przypuszczalnie nie zajdzie praktycznie potrzeba dokładniejszego ustalenia masy kilograma, niż obecnie możliwe; pod tym względem warunki różnią się od tych, o których była mowa wyżej w odniesieniu do metra.

Pomiar trzeciej podstawowej wielkości, mianowicie c z a s u, ma nieco odmienny charakter, niż pomiar innych wielkości. Naogół mówiąc, wzrasta dokładność pomiaru czasu znacznie z długością mierzonego okresu, gdyż każdy pomiar czasu jest przedewszystkiem związany z pewnemi bezwzględnemi błędami, zależnemi od konstrukcji przyrządów, służących do określenia początku i końca mierzonego okresu czasu. Pozatem zależy dokładność pomiaru od dokładności używanego zegara, która może być bardzo wielką.

Jak już było powiedziane wyżej, wielkością, właściwie charakteryzującą dokładność i dobroć zegara, jest zmiana chodu. Z tego powodu przy zegarach astronomicznych, chronometrach okrętowych i innych precyzyjnych zegarach zwraca się mniej uwagi na wielkość chodu, niż na zmianę chodu. Oczywiście dobry pod tym względem zegar daje się bez większych trudności wyregulować prawie z dowolną dokładnością tak, żeby jego poprawki były małe. Przykładem tego, jak dokładnie można przy pomocy pierwszorzędnego zegara astronomicznego określić czas, może być naprzykład zegar Rieflera w hermetycznej osłonie, dostępny publiczności w Deutsches Museum w Monachjum. Zegar ten wskazuje stale bez uwzględnienia jakichkolwiek korekcyj czas średnioeuropejski z dokładnością ± 0,2 sek. Godne uwagi jest, że zegar ten, chociaż bynajmniej nie pracuje w warunkach szczególnie korzystnych, jest regulowany tylko w odstępach jednego do dwóch tygodni. [16]) Na określenie czasu z podobną dokładnością pozwala zresztą również zegar Głównego Urzędu Miar w Warszawie. Jako przeciętne granice zmian chodu różnego rodzaju zegarów precyzyjnych można obecnie przyjąć następujące:

1. Precyzyjne kieszonkowe zegarki z hamowaniem ankrowem 1 do 2 sek. czyli mniejwięcej 1 do $2 \cdot 10^{-5}$.

2. Chronometry okrętowe (t. zw. Box-Chronometr) 0,1 do 0,2 sek. czyli mniejwięcej 1 do $2 \cdot 10^{-6}$. Niewiele mniejszą dokładność osiąga się przy zegarkach kieszonkowych z hamowaniem chronometrowem.

3. Precyzyjne zegary wahadłowe (astronomiczne) 0,01 do 0,02 sek. czyli mniejwięcej 1 do $2 \cdot 10^{-7}$.

Przy uwzględnieniu odpowiednich poprawek daje się osiągnąć nawet w ciągu kilku miesięcy dokładność pomiaru czasu w granicach mniejwięcej wielkości zmian chodu danego zegara. Odnośne poprawki oblicza się na podstawie równań, których spółczynniki są ustalone z dużej ilości obserwacyj danego zegara przy uwzględnieniu wielkości, które wpływają na chód zegara, przedewszystkiem temperatury i ciśnienia powietrza. Ciekawem jest, że się okazało, iż stosowanie pozornie bardzo dokładnych wzorów, których spółczynniki oblicza się na podstawie teorji najmniejszych kwadratów, nie daje dokładnych wyników, a to z powodu błędów systematycznych. Widzimy więc tu znów potwierdzenie wyżej wypowiedzianego poglądu o ograniczonej wartości stosowania metody najmniejszych kwadratów. Z tego powodu stosuje się obecnie dla obliczania poprawek zegarów również uproszczone wzory. Na zakończenie można skonstatować, że współczesne pierwszorzędne zegary astronomiczne, pracujące w korzystnych warunkach, pozwalają w przeciągu mniejwięcej jednego roku na określenie czasu z dokładnością do 0,01 sek., czyli okres jednego roku można określić ze względną dokładnością mniejwięcej $3 \cdot 10^{-10}$. Jak wielką jest ta dokładność charakteryzuje fakt, że długość doby zmienia się w ciągu stu lat o mniejwięcej 10 sek., czyli mniejwięcej o $3 \cdot 10^{-4}$ sek. na jedną dobę, co odpowiada mniejwięcej względnej zmianie $3 \cdot 10^{-9}$, czyli (średnia) dokładność zegara jest mniejwięcej 10 razy większa, niż stałość prędkości obrotu ziemi. Wyobrażenie o postępach techniki zegarowej daje naprzykład to, że główny zegar, zbudowany w r. 1896 dla obserwatorjum w Pa-

[15]) G u i l l a u m e, La création du Bureau International des Poids et Mesures et son oeuvre, Paris 1927.

[16]) B o c k l. c. p. 113.

ryżu i umieszczony w szczególnie korzystnych warunkach, bo aż 27 m pod poziomem ziemi, dawał możność określania czasu w ciągu mniejwięcej pół roku z dokładnością tylko około 0,3 sek.

O ile chodzi o najdokładniejsze nawet pomiary fizyczne i techniczne, to nie zachodzi właściwie potrzeba dążenia do powiększenia dokładności zegarów.

W porównaniu z dokładnością osiągalną obecnie przy pomiarach długości, masy i czasu schodzi dokładność wszystkich innych pomiarów najwyższej precyzji na dalsze miejsca. Najważniejszym z tych pomiarów, które interesują elektryków, jest ustalenie jednostek wielkości elektrycznych i ich podstawowych wzorców. Można uważać, że międzynarodowy ohm jest obecnie ustalony z dokładnością kilku miljonowych, a siła elektromotoryczna ogniwa Westona z dokładnością mniejwięcej jednej stutysięcznej. Dokładność, z jaką jest ustalona wielkość ohma bezwzględnego, wynosi parę stutysięcznych, a dokładność ustalenia wielkości bezwzględnego ampera jest nieco mniejsza. Zrozumiałe jest więc dążenie do osiągnięcia większych dokładności przy ustaleniu podstawowych wzorców jednostek wielkości elektrycznych [17]).

Dalszą kwestją, która może najwięcej interesuje technika, jest dokładność pomiarów technicznych różnego rodzaju. W ramach tej pracy nie można oczywiście omawiać szczegółowo dokładności wszelkich pomiarów, spotykanych w technice należy jednak wymienić pewne dane, dotyczące dokładności poszczególnych pomiarów i metod pomiarowych.

Prawie w każdej dziedzinie techniki pomiarowej napotyka się przedewszystkiem na pomiary wielkości podstawowych naszego układu jednostek, t. zn. pomiary długości, masy i czasu. Skala dokładności tych pomiarów w technice jest bardzo rozległa. Najdokładniejsze techniczne pomiary długości są, jak już wyżej zaznaczono, tak dokładne, że ich wykonanie bezwzględne, t. zn. wyrażenie w ustalonych jednostkach, jest z pożądaną dokładnością właściwie niemożliwe ze względu na niedostateczną dokładność ustalenia jednostki długości. Ta duża dokładność, wymagana przy niektórych pomiarach technicznych, jest uwarunkowana potrzebami współczesnej fabrykacji wymiennej. Techniczne pomiary długości są zupełnie odrębną, nader rozwiniętą gałęzią miernictwa, której jest poświęcony cały szereg specjalnych dzieł [18]). W praktyce elektrotechnicznej naogół nie zachodzi potrzeba bardzo dokładnego mierzenia długości. Przy pomiarach małych długości (mniejwięcej do 25 mm) wystarcza zazwyczaj stosowanie dokładnych mikrometrów śrubowych, które pozwalają na osiągnięcie dokładności pomiaru do 3 μ, a przy uwzględnieniu korekcji nawet jeszcze nieco większej. Do pomiarów większych długości (mniejwięcej do 250 mm) wystarczają zazwyczaj precyzyjne przymiary suwakowe, przy zastosowaniu których daje się uzyskać dokładność mniejwięcej 0,05 mm, albo nawet nieco wyższą. Do pomiaru jeszcze większych długości wystarczają w praktyce elektrotechnicznej zazwyczaj miarki kreskowe, przyczem w wielu wypadkach najwygodniejszem jest stosowanie nowoczesnych miarek stalowych o przekroju wygiętym; dokładność pomiaru przy pomocy tego rodzaju narzędzi wynosi mniejwięcej 1 mm. Najczęściej dokładność pomiarów długości, wykonywanych przez elektrotechnika, nie jest dana dokładnością zastosowanego do pomiarów przyrządu, lecz tem, że sama mierzona długość nie może być uważana za dostatecznie ustaloną.

Dokładniejszy pomiar masy jest w technice naogół potrzebny tylko w odniesieniu do stosunkowo małych mas (analizy chemiczne, określenie gęstości ciał i t. p.). Do tych celów wystarczają w zupełności dobre, t. zw. analityczne wagi o nośności do 200 g, które pozwalają na ważenie z dokładnością paru setnych miligrama. W praktyce elektrotechnicznej spotykają się dokładne ważenia stosunkowo rzadko i mogą być zawsze bez wielkich trudności wykonane z dostateczną dokładnością.

Stosunkowo duże znaczenie mają przy pomiarach elektrotechnicznych pomiary czasu, które zachodzą przedewszystkiem przy regulowaniu i określaniu błędów motorowych, liczników energji elektrycznej. Do tych i podobnych celów używa się stoperów (sekundomierzy), które pozwalają przy zachowaniu odpowiednich ostrożności na pomiar krótszych odstępów czasu z dokładnością około 0,2 sek.[19]).

Nader ważną wielkością, która z większą lub mniejszą dokładnością winna być określona prawie podczas każdego pomiaru fizycznego i technicznego, jest temperatura. Dokładne pomiary temperatury są jednak naogół bardzo trudne i stanowią zupełnie odrębny dział techniki pomiarowej, któremu jest poświęcona obszerna literatura specjalna. Z tego właśnie powodu nie było wyżej mowy o dokładności ustalenia skali temperatur i t. p. Mniej dokładne pomiary temperatury wykonuje się zazwyczaj zapomocą termometrów rtęciowych. Autor uważa więc za potrzebne podkreślić, że w większości wypadków przecenia się dokładność rezultatu, oceniając ją niesłusznie tylko według dokładności, z którą się odczytało wskazania przyrządu interpolacyjnego, np. termometru rtęciowego. Wystarczy chociażby nadmienić, że dokładne odczytanie temperatury na skali termometru rtęciowego jest w większości przypadków iluzoryczne, jeżeli nie została uwzględniona poprawka na wystający słupek rtęci.

Skala dokładności właściwych pomiarów elektrotechnicznych jest bardzo rozległa. Najdokładniejszemi pomiarami są pomiary oporów zapomocą mostków Wheatstone'a i Thomsona (Lorda Kelvina) i metodą kompensacyjną. Najwyższą dokładność osiąga się przy zastosowaniu mostków, złożonych wyłącznie z oporów normalnych. Tego rodzaju pomiary wchodzą przedewszystkiem w rachubę przy kontroli wzorców użytkowych oraz precyzyjnych opornic kołkowych i korbkowych. W pomiarach względnych, t. zn. przy porównaniach wiel-

[17]) Patrz odnośnik [13]).

[18]) Jako podstawowe dzieło z dziedziny technicznych pomiarów długości należy w pierwszym rzędzie wymienić: G. Berndt „Grundzüge und Geräte technischer Längenmessungen" wyd. 2 Berlin 1929. (Springer).

[19]) Szczególnie należy zwrócić uwagę na błędy, wynikające z ekscentrycznego położenia osi wskazówki względem tarczy stopera; patrz Krukowski l. c. p. 399.

kości oporów mierzonych z oporami normalnemi, używanemi jako wzorce, daje się łatwo uzyskać dokładność sięgająca jednej miljonowej. Dokładność wyrażona w ohmach jest jednakowoż znacznie mniejsza ze względu na niepewność dokładnej wartości używanych wzorców. Dokładność pomiarów wykonanych przy pomocy mostków i kompensatorów, składających się z precyzyjnych opornic kołkowych albo korbkowych, dochodzi mniejwięcej do 0,2‰ i daje się podnieść do mniejwięcej 0,1‰, a przy uwzględnieniu wszelkiej potrzebnej ostrożności może nawet do 0,05‰, jeżeli się uwzględnia poprawki poszczególnych oporów, wchodzących w skład przyrządów. Granica dokładności jest przedewszystkiem dana niezupełnie określoną temperaturą oporów.

Jeżeli chodzi o sposób wykonania opornic, to znacznie wygodniejszemi w stosowaniu są opornice korbkowe i niesłuszne jest zdanie niektórych autorów, że należy uważać opornice kołkowe za dokładniejsze. Przy aparatach kompensacyjnych zresztą wchodzą w rachubę tylko opornice korbkowe.

Dokładność pomiarów napięcia i natężenia prądu zapomocą precyzyjnych aparatów kompensacyjnych jest mniejwięcej ta sama co pomiaru oporów. Jest ona zależna prócz dokładności oporów kompensatora od dokładności, z którą jest znana siła elektromotoryczna zastosowanego ogniwa normalnego.

Do precyzyjnych pomiarów prądu zmiennego zaliczają się przedewszystkiem badania transformatorów mierniczych, wykonywane metodą kompensacyjną. Ze znanych metod wchodzi w pierwszym rzędzie w rachubę metoda Schering-Alberti, która pozwala na osiągnięcie dokładności mniejwięcej 0,1% przy pomiarze uchybień prądowych i napięciowych, i paru minut przy pomiarach uchybienia kątowego; pomiary względne dają się wykonać z jeszcze nieco większą dokładnością. Dokładność pomiaru napięć zapomocą metody kompensacyjnej zależy przy prądzie zmiennym przedewszystkiem od dokładności przyrządu, służącego do określania natężenia prądu pomocniczego. W tym względzie należy dążyć do dalszych udoskonaleń aparatury. W każdym razie dają się obecnie osiągnąć dokładności mniejwięcej 0,5 do 1‰ przy pomiarze napięć i jednego stopnia przy pomiarze rozsuwu faz między dwoma napięciami [20]).

Poza pomiarami oporu najczęściej spotykanemi pomiarami technicznemi są pomiary natężenia prądu, napięcia, mocy i pracy. Do pomiaru trzech pierwszych wielkości stosuje się normalnie przyrządy wskazówkowe, do pomiaru pracy — liczniki. Precyzyjne przyrządy wskazówkowe, zwane zazwyczaj laboratoryjnemi, umożliwiają przy odpowiednich warunkach pomiar z dokładnością do 0,2, w najlepszym przypadku do 0,1%. Przy zastosowaniu specjalnych środków ostrożności i sprzyjających warunkach daje się osiągnąć dokładność 0,05%. Już dla uzyskania choćby dokładności 0,2% konieczne jest uwzględnienie poprawek przyrządów. W każdym razie wzrasta względna dokładność pomiaru z wielkością odczytu i dlatego należy przy wykonywaniu dokładnych pomiarów dobierać zakres przyrządu tak, żeby odchylenia przyrządu były możliwie duże. Podane wyżej osiągalne dokładności odnoszą się do wypadków, kiedy odchylenie wynosi conajmniej 2/3 maksymalnego odchylenia.

Nieco większą dokładność, niż przy pomocy przyrządów wskazówkowych, daje się osiągnąć przy pomocy przyrządów torsyjnych. Przyrządy te są używane głównie jako watomierze do specjalnych celów. Na tem miejscu warto również wspomnieć o opracowanym niedawno w Bureau of Standards przyrządzie na prąd zmienny, który jest poniekąd kombinacją przyrządu zerowego i odchyłowego i który pozwala na osiąganie znacznie większych dokładności pomiaru, niż przyrządy wskazówkowe [21]).

Określenie poprawek oporów, przyrządów wskazówkowych i t. p. powinno być wykonywane w niedługich odstępach czasu.

Przy oporach precyzyjnych, naogół bardzo niezmiennych, o ile są używane w należyty sposób, można się przedewszystkiem spodziewać większych zmian w krótkim czasie po ich wykończeniu. Jako odstępy czasu, w których powinno się w dobrze urządzonem laboratorjum opory precyzyjne sprawdzać lub oddawać do sprawdzania, można podać mniejwięcej następujące. Wszelkiego rodzaju nowe opory sprawdza się natychmiast po dostarczeniu przez wytwórnię, oraz po upływie mniejwięcej jednego roku. Opory normalne powinno się następnie sprawdzać conajmniej co dwa lata, a o ile chodzi o właściwe wzorce, z któremi się prównuje inne normalne opory, to należy je sprawdzać conajmniej co rok, wykonując i w międzyczasie stale pewne pomiary kontrolne. Inne precyzyjne opory wystarczy naogół sprawdzać po upływie pierwszego roku w odstępach trzech, ewentualnie nawet do pięciu lat.

Przyrządy wskazówkowe, będące stale w użyciu przy pomiarach dokładnych, należy sprawdzać conajmniej co trzy miesiące, lepiej nawet co miesiąc. O ile chodzi o osiągnięcie maksymalnej możliwej dokładności, należy określić poprawkę przyrządu przed i po pomiarze w warunkach możliwie zbliżonych do warunków, które zachodziły przy pomiarze. Nader ważnem jest uwzględnienie okoliczności, że przyrządy wskazówkowe są zawsze stosunkowo wrażliwe na wstrząsy, i że poprawki ich przy przesyłaniu frachtowem, a tembardziej pocztą zazwyczaj się zmieniają. Z tego powodu tabele korekcyj, dodawane przez niektóre firmy do nowodostarczonych przyrządów, są prawie bezwartościowe, chyba że chodzi o większe korekcje; te ostatnie nie powinny zresztą wogóle zachodzić przy nowodostarczonych, faktycznie precyzyjnych przyrządach. Autor niniejszego artykułu nigdy nie robi użytku z tego rodzaju tabel poprawek. Przyrząd powinien być możliwie sprawdzany w laboratorjum, w którem jest używany, a jeżeli to jest niemożliwe, to przewożony do sprawdzania i z powrotem tak, żeby w miarę możności nie doznał większych wstrząsów. Odpowiednie środki ostrożności należy również zachować przy transporcie przyrządów, o ile są używane poza laboratorjum. Przy tej sposobno-

[20]) Patrz Krukowski „Der Wechselstromkompensator", Berlin 1920. (Springer) p. 41 i 44.

[21]) F. B. Silsbee, Composite — Coil Electrodynamic Instruments Bur. Stand. J. Res. Vol. 8, 1932, p. 217.

sci warto jeszcze nadmienić, że przy próbach odbiorczych maszyn i innych podobnych pomiarach oczywiście nigdy nie dadzą się osiągnąć wyżej podane maksymalne dokładności. Z tego powodu powinno się przy przyrządach, przeznaczonych do podobnych celów, kłaść nacisk nietyle na najwyższą dokładność, w danym wypadku często zupełnie problematyczną, jak przedewszystkiem na pewność, t. zn. niezbyt dużą wrażliwość na wstrząsy, zewnętrzne pola magnetyczne, zmiany temperatury otoczenia i t. p. Jest oczywiście pożądane, żeby i przyrządy, przeznaczone do dokładnych pomiarów laboratoryjnych, odpowiadały tym warunkom, ale nie jest to tak konieczne, jak w przyrządach, używanych do pomiarów ruchowych.

Ważnem jest również uświadomić sobie, jak należy rozumieć dane, dotyczące dokładności przyrządów, podawane w katalogach firm, wzgl. gwarantowane przez firmy lub ustalone przez jakiekolwiek przepisy. Jeżeli nie jest inaczej wyraźnie zaznaczone, to należy taką dokładność zawsze rozumieć w tym sensie, że jest ona, a właściwie dokładność pomiaru wykonanego przyrządem, osiągalna bez zastosowania jakichkolwiek poprawek. Z tego powodu tak podana dokładność musi być oczywiście mniejsza, niż możliwa do osiągnięcia przy zastosowaniu korekcyj. O ile jednak przy przyrządach mniej skomplikowanych i mechanicznie odpornych, jak naprzykład przyrządach do pomiaru długości i kątów, odważnikach, poczęści nawet zegarach, oporach, cewkach indukcyjnych, kondensatorach i t. p. przy odpowiednio ostrożnem i należytem użyciu przyrządu mogą być utrzymane jego uchybienia, a tem samem gwarantowana wzgl. przepisana dokładność przez bardzo długi czas, o tyle w elektrycznych przyrządach wskazówkowych są warunki znacznie niekorzystniejsze, i gwarantowane lub przepisane dokładności należy uważać tylko jako te, które mają być dotrzymane przy odbiorze nowego przyrządu. Autor nie twierdzi oczywiście, że elektryczne przyrządy wskazówkowe dobrej konstrukcji, przy których użyciu są zachowywane odpowiednie środki ostrożności, nie mogą przez długi czas zachować prawie niezmiennej dokładności.

Uchybienie δ przyrządu ze skalą może być wyrażone wzorem następującego kształtu:

$$\delta = \delta_0 + \varphi(\ ) + \psi(\alpha)$$

Wielkość δ_0 jest to pewna wielkość niezależna od wielkości odczytu α np. odchylenia wskazówki przyrządu wskazówkowego. Wielkość δ_0 zależy od rodzaju przyrządu, jego wykonania i t. p. i jest uwarunkowana między innemi grubością kresek skali, wykonaniem indeksu (np. wskazówki), możliwą wielkością paralaksy, w przyrządach wskazówkowych tarciem w łożyskach i t. p. Funkcja odczytu (np. odchylenia) $\varphi(\alpha)$ wyraża błąd właściwej skali t. z. przesunięcie poszczególnych kresek skali w stosunku do miejsca, na którem miałyby się one znajdować przy idealnie wzorcowanym przyrządzie. Funkcja $\varphi(\alpha)$ ma naogół przebieg zupełnie dowolny, nie dający się określić jakimś wzorem matematycznym. Funkcja $\psi(\alpha)$ jest dana przez jakąś mniej lub więcej określoną zależność jednej części uchybienia od wielkości odczytu. W wielu wypadkach w przyrządach wskazówkowych $\psi(\alpha) = c.\alpha$, t. zn. jest proporcjonalna do odchylenia. To ma naprzykład wtedy miejsce, gdy opór dodatkowy albo bocznik ma niezupełnie prawidłową wielkość oporu [22]). To samo zachodzi również naskutek nienależytej wielkości momentu zwrotnego i t. p. W wielu wypadkach jednak przebieg funkcji $\psi(\alpha)$ jest bardziej skomplikowany. Przebieg ten może być np. zbliżony do kwadratowego, jeżeli zachodzą zmiany oporów wskutek nagrzewania się ich przez prąd. Dokładna, a często nawet tylko przybliżona analiza poszczególnych składowych błędu nie jest możliwa, i zaliczenie jakichś wielkości błędu do jednej lub drugiej kategorji, ustalonej przez powyższy wzór, jest mniej lub więcej dowolne.

Szczególnie duże znaczenie praktyczne ma oczywiście dokładność liczników energji elektrycznej, gdyż od tej dokładności zależą wpływy elektrowni. Ze stosowanych dzisiaj typów liczników mają największą dokładność indukcyjne liczniki jednofazowe i mniejwięcej taką samą liczniki trójfazowe. Liczniki takie dają się tak wyregulować, że w granicach między 1/10 nominalnego obciążenia i obciążeniem nominalnem oraz niezbyt małych spółczynnikach mocy błędy nie przekraczają $\pm 1\%$, ale również przy obciążeniach mniejszych i większych niż leżące w powyższych granicach błędy są jeszcze bardzo małe. Należy jednak uwzględnić, że ta duża dokładność może być praktycznie tylko wtedy wykorzystana, jeżeli może być utrzymana przy wszystkich temperaturach otoczenia, przy których licznik pracuje. Z tego powodu zaopatruje się dziś pierwszorzędne liczniki indukcyjne w specjalną kompensację temperatury. Uwzględniwszy, że liczniki mają dużą dokładność nawet przy bardzo małych obciążeniach, przychodzimy do wniosku, że są one jednemi z najbardziej dokładnych technicznych przyrządów elektrycznych wogóle. Liczniki na prąd stały są naogół mniej dokładne, niż liczniki indukcyjne; wyjątek stanowią liczniki elektrolityczne, o ile mierzoną ma być ilość elektryczności, a nie energja.

Bardzo wielkie znaczenie mają obecnie transformatory miernicze. Duża dokładność ich jest pożądana przedewszystkiem wtedy, kiedy do nich są przyłączone liczniki energji elektrycznej, służące do rozrachunku. Technika transformatorów miernicznych, w szczególności prądowych, zrobiła w ostatnich czasach bardzo duże postępy, (zastosowanie specjalnych stopów żelaza i t. p.) i można twierdzić, że współczesne transformatory miernicze pod względem dokładności, jak również pewności ruchu, prawie nic nie pozostawiają do życzenia. Wpływ przeciętnych dobrych transformatorów mierniczych, np. transformatorów takiej dokładności, jaka jest wymagana w stosunku do transformatorów dopuszczalnych przez Główny Urząd Miar do legalizacji w Polsce, na dokładność pomiarów mocy albo energji nie przekracza w normalnych warunkach pracy $\pm 1\%$, a jeżeli uchybienia transformatorów są uwzględnione przy wzorcowaniu

[22]) O ile $\psi(\alpha)$ jest spowodowane temi przyczynami, to przy przyrządach z kilkoma zakresami można określić poprawki przy różnych zakresach, znając poprawki przy jednym zakresie i jedną (lepiej kilka) poprawkę przy każdym innym zakresie. Na tej podstawie jest oparte skonstruowane swego czasu przez autora urządzenie do obliczania korekcyj (patrz patent niemiecki Nr. 294505 z dnia 6.11. 1915).

przyrządów, to wpływ ten jest jeszcze mniejszy. Przykładem tego, jak dokładne transformatory miernicze są dziś budowane, są np. normalne transformatory prądowe, których uchybienie prądowe nie przekracza w warunkach, dla których są przeznaczone ± 0,03%, a uchybienie kątowe ± 2'.

W związku z omawianiem osiągalnej przy pomiarach dokładności zdaje się koniecznem zwrócenie uwagi na zupełnie elementarny błąd, popełniany jednak nawet bardzo często, mianowicie na nierozróżnianie pojęć dokładności i czułości przyrządu albo metody pomiarowej. Częstokroć spotykamy się z zupełnie mylnem zdaniem, że czuły przyrząd, np. czuły galwanometr, jest zarazem przyrządem dokładnym. O ile chodzi o sam przyrząd, to zazwyczaj właśnie przyrządy czułe przeważnie nie są i nie potrzebują nawet być dokładne. O ile natomiast chodzi o metodę pomiarową, przedewszystkiem o metodę zerową, to czułość zastosowanego przyrządu, naprzykład galwanometru, jest w najlepszym razie tylko jedną z wielkości, od której zależy dokładność pomiaru. Jeżeli naprzykład zostaje wykonany pomiar oporu mostkiem Wheatstone'a, którego poszczególne opory mają dokładność 0,2‰, to nawet gdyby czułość zastosowanego galwanometru pozwalała na odczytanie rezultatu ze znacznie większą dokładnością, t. zn., że galwanometr reagowałby na mniejsze względne zmiany oporu porównawczego, niż 0,2‰, to przez to dokładność pomiaru nie mogłaby być zwiększona. Charakterystyczny przykład nieodróżniania pojęcia czułości od dokładności znajdujemy np. w pewnej niedawno ogłoszonej pracy z dziedziny ciepła, gdzie autor tej pracy oblicza dokładność „bezwzględną" pomiaru temperatury na podstawie czułości galwanometru lusterkowego, który był użyty jako przyrząd zerowy przy pomiarze siły elektromotorycznej termoelementu metodą kompensacyjną w układzie Lindecka. Oczywistem jest, że dokładność pomiaru siły elektromotorycznej zależna była w danym wypadku nie od czułości galwanometru, lecz od dokładności pomiaru natężenia prądu kompensacyjnego, który był mierzony jakimś miliamperomierzem, co do którego w pracy nie znajdujemy żadnych bliższych danych i można nawet przypuszczać, że przy pomiarach nie były uwzględniane poprawki tego przyrządu. W wymienionej pracy można znaleść jeszcze cały szereg nader charakterystycznych przykładów, jakie zasadnicze i zupełnie niedopuszczalne błędy z punktu widzenia techniki pomiarowej są częstokroć popełniane w pracach, które pretendują do miana prac naukowych. Podobnych przykładów, jak wyżej przytoczony, możnaby wymienić bardzo wiele. Dokładność pomiaru przy metodzie zerowej byłaby uwarunkowana czułością przyrządu zerowego tylko wtedy, jeżeliby zastosowany przyrząd był za mało czuły; zazwyczaj jest jednak odwrotnie.

Wreszcie warto może jeszcze poświęcić przynajmniej parę słów temu, z jaką dokładnością powinno się wogóle wykonywać pomiary. O ile przy ustaleniu wielkości wzorców i temu podobnych pomiarach podstawowych w wielu, ale także nie we wszystkich wypadkach, należy dążyć do osiągnięcia najwyższej dokładności, o tyle w większości innych wypadków jako należytą dokładność należy uważać taką, która odpowiada celowi pomiarów. Bynajmniej nie jest dowodem umiejętności wykonania pomiaru, jeżeli pomiar jest wykonany z dokładnością w danym wypadku zupełnie bezcelową.

Należy odróżniać dokładność potrzebną t. zw. właściwą, dokładność osiągalną i dokładność faktycznie osiągniętą. Zastosowana metoda pomiaru powinna pozwalać conajmniej na osiągnięcie dokładności właściwej, a osiągnięta dokładność nie powinna być mniejsza, niż dokładność właściwa. Jeżeli zachodzi możliwość wykonania jakiegoś pomiaru zapomocą różnych metod, to najodpowiedniejszą jest najprostsza metoda, która najszybciej pozwala osiągnąć potrzebną dokładność. W wielu wypadkach nawet metoda w zasadzie mniej dokładna daje ostateczny rezultat dokładniejszy, jeżeli warunki pomiarów są zmienne i szybkie wykonanie pomiaru tem samem powiększa dokładność. W bardzo wielu wypadkach prowadzi zastosowanie nieodpowiedniej metody do wyników, których dokładność przez podanie dużej ilości (znaczących) miejsc w rezultacie wydaje się wielką, podczas gdy w rzeczywistości rezultat jest zupełnie bezwartościowy, gdyż przy pomiarze nie zostały uwzględnione wszystkie czynniki, które należało uwzględnić. Przedewszystkiem należy dbać o to, żeby przy skomplikowanych pomiarach wszystkie mierzone wielkości były określane z należytą dokładnością. Zupełnie błędnem jest mierzenie poszczególnych wielkości z dokładnością, która nie uwzględnia wpływu tej dokładności na dokładność ostatecznego wyniku. Często identyfikuje się zupełnie niesłusznie dokładność odczytu przyrządu z dokładnością pomiaru, wykonanego tym przyrządem. Błąd ten jest zupełnie analogiczny z pomieszaniem pojęć: dokładność i czułość.

Jeszcze więcej należy się dziwić, jak często niesłusznie ocenia się dokładność wyniku według dokładności obliczenia rezultatu i nie uwzględnia się, że dokładne obliczenie nie może zmniejszyć błędów, popełnionych przy pomiarze. Przykładów takich możnaby przytoczyć bardzo dużo; wystarczy może ograniczyć się do jednego, ale nader charakterystycznego, na jaki autor niedawno się natknął.

Chodziło o decyzję, czy uchybienia pewnego licznika magnetomotorycznego, t. zn. przyrządu wogóle, a w szczególności przy małych obciążeniach niezbyt pewnego, nie przekraczają przy 1/10 nominalnego obciążenia granicy 6%, która miała być dopuszczona. Obliczenie wykonane z dostateczną w danym wypadku dokładnością, dało wynik 6,0%. Kontrolne obliczenie dało „dokładniejszy" wynik 6,05%, na zasadzie którego zostało zdecydowane, że dopuszczony błąd został przekroczony. Oczywistem jest, że takie postawienie kwestji jest zupełnie nieprawidłowe. W danym wypadku przy uwzględnieniu rzeczywistej dokładności pomiaru i zmienności wskazań licznika wystarczyłoby w zupełności zaokrąglenie wartości błędu podanego do 0,5%, a chcąc mieć pewność, że błąd nie przekracza wielkości dopuszczonej, należałoby raczej wyregulować licznik tak, żeby pomiar nie wykazał większego błędu, niż 5,5%. Jeżeli natomiast uważało się za możliwe dopuszczenie nieco większego błędu, to wszelka dyskusja nad tem, czy wynosi on 6,0 czy 6,1, nie mówiąc już o 6,05%, jest dowodem niezrozumienia faktycznego stanu rzeczy.

Jaka dokładność w różnych przypadkach jest właściwa, nie może być oczywiście na tem miejscu omawiane. W każdym razie jest jednak pożytecznem zwrócić uwagę na to, że zachodzi zasadnicza różnica między pomiarem jakiejś wielkości zupełnie określonej, naprzykład wielkości wzorca oporu, i pomiarem własności jakiegoś materjału, naprzykład oporu właściwego stopu czy nawet czystego metalu. O ile nie chodzi o określenie własności zupełnie określonej próbki, mającej specjalne znaczenie, to określenie takiej własności z dużą dokładnością jest zazwyczaj zupełnie bezcelowe i podanie dokładnego rezultatu pomiaru wykonanego na określonej próbce jako wartości, mającej ogólne znaczenie, jest tylko wprowadzeniem w błąd, gdyż nasuwa przypuszczenie, że dany materjał jest dokładnie zdefinjowany, co zachodzi tylko przy zupełnie niewielu ciałach, których własności chemiczne i fizyczne są w wysokim stopniu niezmienne. Pod tym względem wartości, podawane w różnego rodzaju tablicach, często nie mają praktycznie żadnego znaczenia. Autorzy tablic powinni pod tym względem być więcej krytycznymi, niż to naogół ma miejsce. Należałoby dążyć do podawania w tablicach granic, w których dana wielkość normalnie się mieści, albo średniej wartości, z podaniem normalnie spotykanych odchyleń od niej.

Na zakończenie autor chciałby podkreślić, że ogólna tendencja przy pomiarach technicznych idzie dzisiaj w kierunku budowy takich przyrządów i stosowania takich metod, żeby potrzebna dokładność pomiarów mogła być osiągnięta w możliwie prosty i pewny sposób, bez wprowadzania jakichkolwiek poprawek i t. p.

Jednakowoż, szczególnie przy pomiarach o charakterze naukowo-badawczym, jest w każdym wypadku nieodzownie potrzebne zastanowienie się nad wszystkiem, co jest związane z dokładnością samych pomiarów i obliczaniem rezultatów, gdyż bez tego nie można osiągnąć wyników, mających faktycznie znaczenie praktyczne i naukowe.