

doc. K. Plekko

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**INSTYTUTU  
ŁĄCZNOŚCI**



1991

4



**BIULETYN  
INFORMACYJNY  
INSTYTUTU  
ŁĄCZNOŚCI**

ROK 31

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

NR 4(290)

---

WARSZAWA 1991

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny: dr inż. Krystyn Plewko

Z-ca Redaktora Naczelnego: dr inż. Stanisław Sońta

Redaktorzy Działowi:

doc. dr inż. Włodzimierz Barjasz

doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska

inż. Maria Łopuszniak

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juskiewicz

Montaż tekstu: Barbara Skwara

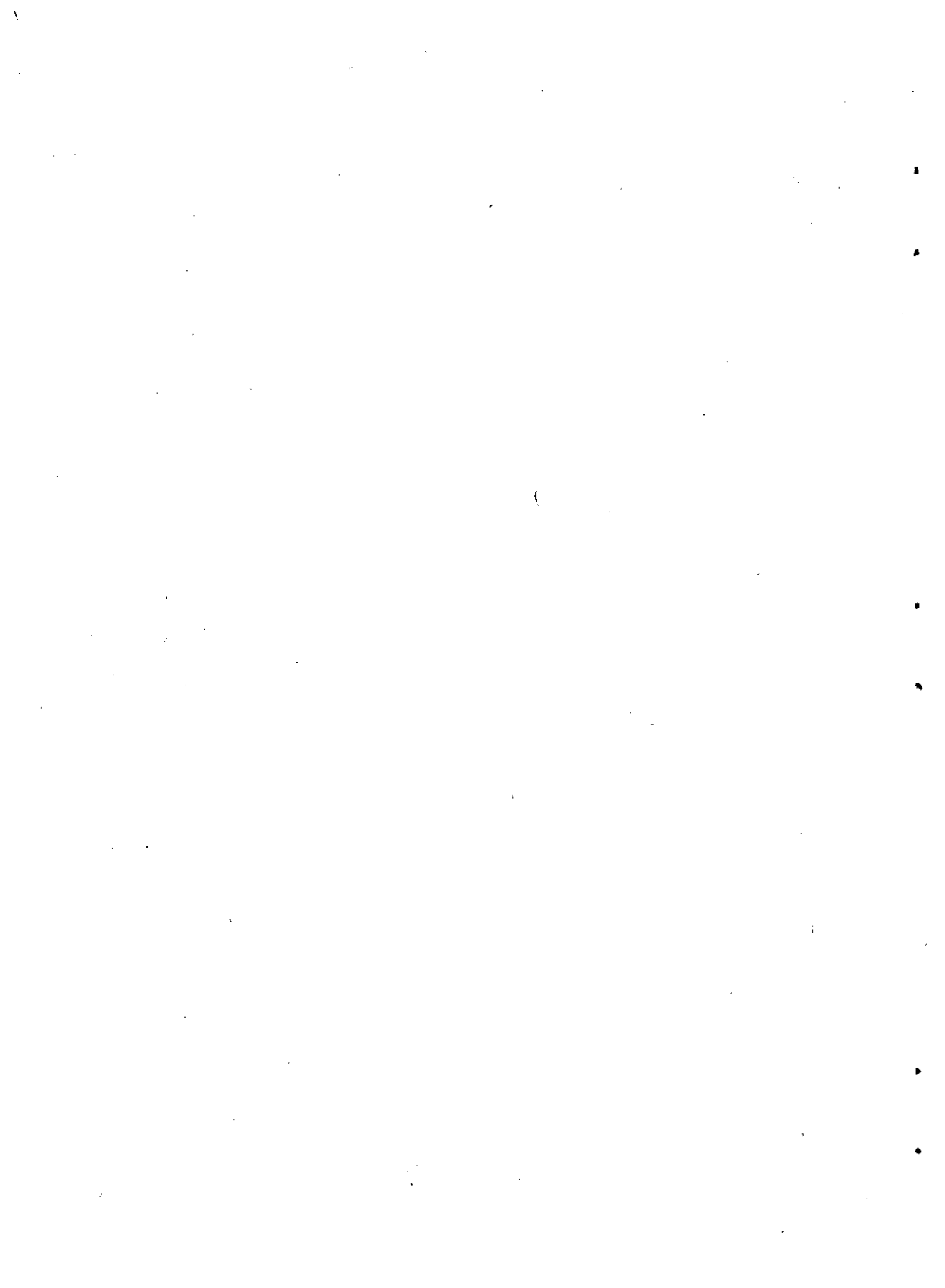
---

Instytut Łączności, Dział Ogólnotechniczny  
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa

JEDNOSTKI MIAR STOSOWANE W TELEKOMUNIKACJI

SPIS TREŚCI

|   | Str. |
|---|------|
| 1. Wprowadzenie   | 1    |
| 2. Legalne jednostki miar stosowane w Polsce  | 2    |
| 2.1. Międzynarodowy Układ Jednostek Miar  | 3    |
| 2.2. Definicje jednostek miar SI i ich wzorce   | 7    |
| 2.3. Jednostki miar wielkości elektrycznych układu SI i ich wzorce                                  | 15   |
| 2.4. Legalne jednostki miar nie należące do układu SI   | 24   |
| 2.5. Zasada tworzenia i pisowni wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar                   | 28   |
| 2.6. Zasady stosowania oraz budowy i pisowni nazw oraz oznaczeń jednostek miar                      | 30   |
| 2.7. Oznaczanie jednostek miar drukowanych przez urządzenia drukujące o ograniczonej liczbie znaków | 32   |
| 3. Wielkości logarytmiczne stosowane w telekomunikacji  | 36   |
| 3.1. Podstawowe oznaczenia i definicje  | 36   |
| 3.2. Bel i neper  | 39   |
| 3.2.1. Tło historyczne  | 39   |
| 3.2.2. Podstawowe zastosowania decybel i nepera   | 42   |
| 3.2.3. Inne zastosowania jednostki decybel  | 53   |
| 4. Pozostałe specjalistyczne wielkości i ich jednostki  | 55   |
| Wykaz literatury  | 57   |



## JEDNOSTKI MIAR STOSOWANE W TELEKOMUNIKACJI

### 1. WPROWADZENIE

Metr i kilogram to powszechnie znane jednostki miar towarzyszące współczesnemu człowiekowi na co dzień. Są one podstawą systemu metrycznego, powstałego w Europie w roku 1875 w wyniku podpisania w Paryżu przez 17 państw Konwencji Metrycznej (Polska przystąpiła do Konwencji w 1925 r.).

System metryczny oparty na metrze - jednostce długości i kilogramie - jednostce masy, wprowadził dziesiętny podział tych jednostek, stanowiąc solidny fundament, umożliwiający racjonalny rozwój gospodarczy oraz ułatwiający postęp techniczny i cywilizacyjny (w tym także rozwój badań naukowych i wymiany międzynarodowej).

System ten, po wielu udoskonaleniach, przybrał w 1960 r. postać Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (układu SI<sup>1)</sup>) w wyniku ustaleń przyjętych przez XI Generalną Konferencję Miar i jest obowiązujący w całym świecie. W Polsce system SI zalecono do stosowania w 1966 r. aktem prawnym w randze ustawy, nie precyzując zasad wycofywania z użycia jednostek miar dotąd stosowanych. Dopiero w latach 1975 i 1976 uściślono zasady i ogólny program wprowadzania jednostek miar Międzynarodowego Układu Jednostek Miar do stosowania w gospodarce narodowej. Obecnie trwają przygotowania do nowelizacji aktów prawnych (tzn. Zarządzeń Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacji Miar i Jakości), dotyczących legalnych jednostek miar stosowanych w Polsce.

Burzliwy rozwój nauki i techniki wymaga wprowadzania definicji nowych miar i ich jednostek, co występuje głównie w bardzo szybko rozwijających się dziedzinach, takich jak elektronika i telekomunikacja. Na przykład rozwój techniki

---

1) SI - Système International d'Unites.

niskich temperatur umożliwił badania nadprzewodnictwa i wykrycie nowych zjawisk, które przyczyniły się do realizacji nowych wzorców jednostek miar podstawowych wielkości elektrycznych, takich jak wolt (złącze Josephsona - 1962 r.) i om (kwantowe zjawisko Halla, Klitzing - 1980 r.), z niespotykaną dotychczas dokładnością lepszą od  $1 \cdot 10^{-7}$ . Międzynarodowe doświadczenia w zakresie realizacji tych dwu jednostek doprowadziły do zmian wartości jednostek wielkości elektrycznych i magnetycznych, które wprowadzono z dniem 1 stycznia 1990 r. we wszystkich narodowych laboratoriach metrologicznych na świecie, zgodnie z zaleceniem XVIII Generalnej Konferencji Miar.

Przedstawienie wybranych jednostek miar stosowanych w telekomunikacji, łącznie z ich definicjami i oznaczeniami, opatrzonych komentarzem zaznajomi czytelników z podstawowymi zadaniami metrologii, tzn. z:

- podwyższaniem dokładności pomiarów tak, aby zaspokajała ona najostrzejsze wymagania nauki i techniki;
- zapewnianiem jednolitości miar w poszczególnych krajach i na arenie międzynarodowej.

Pozwoli to na poprawne używanie tych jednostek miar w ich codziennym stosowaniu.

## 2. LEGALNE JEDNOSTKI MIAR STOSOWANE W POLSCE

"W aktach i czynnościach urzędowych i zawodowych, w czynnościach wchodzących w zakres gospodarki narodowej, mających znaczenie dla bezpieczeństwa i higieny pracy, ochrony zdrowia lub interesu społecznego, miarę<sup>2)</sup> wyraża się w legalnych jednostkach miary". Przytoczony wyżej cytat z art. 3 ustawy z dnia 17 czerwca 1966 r. o miarach i narzędziach pomiarowych zawiera podstawowe postanowienie, nakładające powszechny obowiązek stosowania jednostek miar nazywanych legalnymi,

2) Słowo "miara" jest tu użyte w znaczeniu "wartość wielkości".



tzn. jednostek których stosowanie jest nakazane lub dozwolone przepisem prawnym.

Określony ustawą zakres obowiązywania legalnych jednostek miar praktycznie obejmuje wszystkie zastosowania pomiarów. Jednostki miar inne niż legalne mogą być stosowane tylko w wyjątkowych przypadkach, które określa art. 5 ustawy, a mianowicie:

- 1) w pracach naukowych, naukowo-badawczych i doświadczalnych;
- 2) do celów związanych z obronnością;
- 3) do celów związanych z handlem zagranicznym.

Wprowadzenie w życie ustawy o miarach Rada Ministrów poleciła Prezesowi Polskiego Komitetu Normalizacji Miar i Jakości (PKNMIJ).

Prezes PKNMIJ, uwzględniając postanowienia organizacji międzynarodowych, przede wszystkim organów Konwencji Metrycznej (głównie Generalnej Konferencji Miar), Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej - OIML, Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej - ISO, Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej - IEC i Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej - ICI, ustala szczegóły dotyczące zbioru legalnych jednostek miar.

Legalnymi jednostkami miar w Polsce są:

- jednostki Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI);
- wybrane jednostki miar nie należące do układu SI;
- jednostki pochodne mieszane.

## 2.1. Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI)

Obowiązujący w Polsce od 1 stycznia 1967 r., Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI<sup>3)</sup>) opiera się na siedmiu jednostkach podstawowych (por. tabl. 1 poz. od 1 do 7) i dwu bezwymiarowych jednostkach uzupełniających (por. tabl. 1

<sup>3)</sup> W skrócie zwany układem SI.

poz. 8 i 9). Z iloczynów i ilorazów jednostek podstawowych i uzupełniających SI tworzy się pochodne jednostki miar służące do wyrażania jednostek miar innych wielkości fizycznych. Pochodne jednostki miar mogą mieć swoje nazwy proste i oznaczenia inne niż by to wynikało z wyrażenia ich wymiarów za pomocą jednostek podstawowych i uzupełniających układu SI (por. tabl. 2). Liczba tych jednostek nie jest ograniczona.

Tablica 1  
Podstawowe i uzupełniające jednostki miar układu SI

| Lp. | Wielkość           | Jednostka miary |            |
|-----|--------------------|-----------------|------------|
|     |                    | nazwa           | oznaczenie |
| 1.  | Długość, odległość | metr            | m          |
| 2.  | Masa               | kilogram        | kg         |
| 3.  | Czas               | sekunda         | s          |
| 4.  | Prąd elektryczny   | amper           | A          |
| 5.  | Temperatura        | kelwin          | K          |
| 6.  | Liczność materii   | mol             | mol        |
| 7.  | Światłość          | kandela         | cd         |
| 8.  | Kąt płaski         | radian          | rad        |
| 9.  | Kąt bryłowy        | steradian       | sr         |

Tablica 2  
Pochodne jednostki miar SI wybranych wielkości

| Lp. | Wielkość                        | Jednostka miary |                | Relacje między jednostkami         |
|-----|---------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------------|
|     |                                 | nazwa           | oznaczenie     |                                    |
| 1   | 2                               | 3               | 4              | 5                                  |
| 1   | Powierzchnia (pole powierzchni) | metr kwadratowy | m <sup>2</sup> | 1 m <sup>2</sup> = 1 m · 1 m       |
| 2   | Objętość                        | metr sześcienny | m <sup>3</sup> | 1 m <sup>3</sup> = 1 m · 1 m · 1 m |
| 3   | Częstotliwość                   | herc            | Hz             | 1 Hz = 1:(1 s)                     |

| 1  | 2   | 3                         | 4              | 5  |
|----|---|---------------------------|----------------|--|
| 4  | Prędkość liniowa  | metr na sekundę           | m/s            | $1 \text{ m/s} = 1 \text{ m} : (1 \text{ s})$        |
| 5  | Prędkość kąтова   | radian na sekundę         | rad/s          | $1 \text{ rad/s} = 1 \text{ rad} : (1 \text{ s})$    |
| 6  | Przyspieszenie liniowe  | metr na kwadrat sekundy   | $\text{m/s}^2$ | $1 \text{ m/s}^2 = (1 \text{ m/s}) : (1 \text{ s})$  |
| 7  | Siła  | niuton                    | N              | $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m/s}^2)$ |
| 8  | Moment siły   | niutonometr               | N·m            | $1 \text{ Nm} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$       |
| 9  | Ciśnienie   | paskal                    | Pa             | $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} : (1^2 \text{ m})$       |
| 10 | Energia, praca  | dżul                      | J              | $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$        |
| 11 | Moc, strumień energii   | wat                       | W              | $1 \text{ W} = 1 \text{ J} : (1 \text{ s})$          |
| 12 | Gęstość mocy  | wat na metr kwadratowy    | $\text{W/m}^2$ | $1 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ W} : (1 \text{ m}^2)$    |
| 13 | Gęstość prądu elektrycznego   | amper na metr kwadratowy  | $\text{A/m}^2$ | $1 \text{ A/m}^2 = 1 \text{ A} : (1 \text{ m}^2)$    |
| 14 | Ładunek elektryczny   | kulomb                    | C              | $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$        |
| 15 | Napięcie elektryczne, siła elektromotoryczna, potencjał elektryczny | wolt                      | V              | $1 \text{ V} = 1 \text{ W} : (1 \text{ A})$          |
| 16 | Pole elektryczne  | wolt na metr              | V/m            | $1 \text{ V/m} = 1 \text{ V} : (1 \text{ m})$        |
| 17 | Indukcja elektryczna  | kulomb na metr kwadratowy | $\text{C/m}^2$ | $1 \text{ C/m}^2 = 1 \text{ C} : (1 \text{ m}^2)$    |
| 18 | Pojemność elektryczna   | farad                     | F              | $1 \text{ F} = 1 \text{ C} : (1 \text{ V})$          |

| 1  | 2  | 3              | 4                       | 5   |
|----|--|----------------|-------------------------|---|
| 19 | Przenikalność elektryczna (bezwzględna)                        | farad na metr  | F/m                     | $1 \text{ F/m} = (1 \text{ C/m}^2) : (1 \text{ V/m})$   |
| 20 | Opór elektryczny, rezystancja, reaktancja, impedancja          | om             | $\Omega$                | $1 \Omega = 1 \text{ V} : (1 \text{ A})$  |
| 21 | Opór elektryczny właściwy, rezystywność elektryczna            | omometr        | $\Omega \cdot \text{m}$ | $1 \Omega \cdot \text{m} = 1 \Omega \cdot (1 \text{ m}^2) : (1 \text{ m})$                                  |
| 22 | Przewodność elektryczna, konduktacja, susceptancja, admitancja | simens         | S                       | $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1} = 1 : (1 \Omega)$  |
| 23 | Przewodność elektryczna właściwa, konduktywność elektryczna    | simens na metr | S/m                     | $1 \text{ S/m} = 1 : (1 \Omega \cdot \text{m})$   |
| 24 | Strumień magnetyczny, strumień indukcji magnetycznej           | weber          | Wb                      | $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$  |
| 25 | Indukcja magnetyczna   | tesla          | T                       | $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} : (1 \text{ m}^2)$  |
| 26 | Pole magnetyczne, natężenie pola magnetycznego                 | amper na metr  | A/m                     | $1 \text{ A/m} = 1 \text{ A} : (1 \text{ m})$   |
| 27 | Indukcyjność   | henr           | H                       | $1 \text{ H} = 1 \text{ V} : [1 \text{ A} : (1 \text{ s})] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} : (1 \text{ A})$ |
| 28 | Przenikalność magnetyczna (bezwzględna)                        | henr na metr   | H/m                     | $1 \text{ H/m} = 1 \text{ T} : (1 \text{ A/m})$   |
| 29 | Siła magnetomotoryczna, napięcie magnetyczne                   | amper          | A                       | $1 \text{ A} = 1 \cdot 1 \text{ A}$   |

od. tabl. 2

| 1  | 2                        | 3                                 | 4                | 5   |
|----|--------------------------|-----------------------------------|------------------|---|
| 30 | Natężenie napromienienia | wat na metr kwadratowy            | $W/m^2$          | $1 W/m^2 = 1 W : (1 m^2)$                         |
| 31 | Napromienienie           | dżul na metr kwadratowy           | $J/m^2$          | $1 J/m^2 = (1 W/m^2) \cdot 1 s$                   |
| 32 | Natężenie promieniowania | wat na steradian                  | $W/sr$           | $1 W/sr = 1 W : (1 sr)$                           |
| 33 | Natężenie dźwięku        | wat na metr kwadratowy            | $W/m^2$          | $1 W/m^2 = 1 W : (1 m^2)$                         |
| 34 | Opór akustyczny          | paskalosekunda na metr sześcienny | $Pa \cdot s/m^3$ | $1 Pa \cdot s/m^3 = 1 Pa : (1 m^3/s)$             |
| 35 | Opór akustyczny właściwy | paskalosekunda na metr            | $Pa \cdot s/m$   | $1 Pa \cdot s/m = (1 Pa \cdot s/m^3) \cdot 1 m^2$ |

Jednostki SI wielkości elektrycznych i magnetycznych są określone na podstawie zracjonalizowanych postaci równań pola elektromagnetycznego przy założeniu, że stała magnetyczna (przenikalność magnetyczna) próżni  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ .

## 2.2. Definicje jednostek miar SI i ich wzorce

Określenie jednostek miar podstawowych i uzupełniających powinno być oparte na wzorcach materialnych lub wyidealizowanych łatwo odtwarzalnych z możliwie największą dokładnością przy zachowaniu niezmienności parametrów tych wzorców. Pierwszymi wzorcami materialnymi jednostek długości i masy były międzynarodowe wzorce - prototypy metra i kilograma, przechowywane do dziś w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres pod Paryżem. Natomiast definicja jednostki czasu - sekundy

była oparta na pewnym wyidealizowanym pojęciu (wzorcu naturalnym), tzw. średniej dobie słonecznej, zjawisku astronomicznym związanym z dwoma kolejnymi przejściami Ziemi przez określony punkt orbity dookoła Słońca. Podobnie definicja jednostki temperatury - kelwin została oparta na pojęciu termodynamicznej skali temperatur związanej z zasadą działania idealnego silnika z tzw. obiegiem Carnota lub przemianą izochoryczną gazu doskonałego (z termometrem gazowym). Również definicja jednostki (natężenia) prądu elektrycznego, dotychczas niezmieniona, oparta jest na wyidealizowanym pojęciu przewodników elektrycznych równoległych, prostoliniowych i nieskończenie długich o znikomym małym przekroju kołowym, umieszczonych w próżni.

Mimo oparcia definicji niektórych jednostek miar na powyższych wyidealizowanych wzorcach możliwa jest jednak realizacja wzorców materialnych, odtwarzających powyższe jednostki miar z najwyższą dokładnością odpowiednią do aktualnego poziomu techniki pomiarowej.

Nowe odkrycia naukowe, a szczególnie rozwój fizyki atomowej, przyczyniły się do powstania wzorców o niespotykanych do niedawna poziomach dokładności.

### Metr (m) i kilogram (kg)

W końcu XVIII wieku we Francji przystąpiono do gruntownej reformy miar stosowanych na jej terytorium. Założeniem tej reformy było stworzenie jednego spójnego systemu miar. Podstawę tego systemu miała stanowić jednostka długości. W 1795 r. zaproponowano jako podstawową jednostkę długości - długość odcinka równą  $1/10\ 000\ 000$  części ćwiartki południka ziemskiego (kwadrantu) i nadanie jej nazwy metr. W 1799 r. za podstawową jednostkę miary ilości materii (masy) przyjęto masę czystej chemicznie wody mieszczącej się w objętości  $1/1000\ m^3$  ( $1\ dm^3$ ) w temperaturze (około  $+4^\circ C$ ), przy której gęstość wody osiąga wartość maksymalną.

Wzorzec metra zdefiniowany jak wyżej nie nadawał się do bezpośrednich praktycznych zastosowań. Dlatego też dopiero po kilku latach, po dokonaniu pomiarów części południka ziemskiego, sporządzono wzorzec praktyczny w postaci platynowego pręta o przekroju prostokątnym, którego długość miała odpowiadać 1 metrowi. Wzorzec ten nazwano metrem archiwalnym (okazał się on krótszy o około 0,23 mm od długości opartej na definicji z 1795 r.).

W tym samym czasie sporządzono także archiwalny wzorzec - prototyp kilograma. Wskutek zastosowania niewłaściwych technologii wykonania wzorce archiwalne nie gwarantowały wysokich dokładności osiągaly one rząd  $1 \cdot 10^{-5}$  dla metra i  $1 \cdot 10^{-7}$  dla kilograma. W związku z tym sporządzono nowe wzorce metra i kilograma wykonane ze stopu platyny i irydu. Po porównaniu ich z archiwalnymi wzorcami wybrano egzemplarze najbardziej zbliżone do wzorców archiwalnych. Te wzorce - to prototypy międzynarodowe metra i kilograma rozpowszechnione w 1889 r. pomiędzy państwa będące członkami Międzynarodowej Konwencji Miar. Metr, zdefiniowany jako długość wzorca kreskowego (odległość między kreskami głównymi), wykonano w postaci belki o przekroju zbliżonym do litery X z dokładnością rzędu  $1 \cdot 10^{-6}$ , natomiast kilogram - zdefiniowany na podstawie nowego wzorca metra wykonano w postaci walca o wysokości równej średnicy (około 39 mm) z niedokładnością rzędu  $1 \cdot 10^{-9}$ .

Następna definicja metra, przyjęta w 1960 r., została oparta na zjawisku interferencji świetlnej, tzn. na powstawaniu przyciemnień i rozjaśnień (tzw. prążków) w wyniku nakładania się niezgodnych w fazie fal świetlnych z dwu spójnych wiązek. Przyjęto wówczas taką liczbę fal, aby ich łączna długość możliwie ściśle odpowiadała odległości ograniczonej dwiema kreskami głównymi na wzorcu prototypie międzynarodowym metra. W myśl tej definicji metr jest długością równą 1650763,73 długości fali w próżni, promieniowania odpowiadającego przejściu między poziomami  $2p_{10}$  a  $5d_5$  atomu

$^{86}\text{Kr}$  (kryptonu 86). Dokładność realizacji takiego wzorca osiągnęła poziom  $1 \cdot 10^{-8}$ .

Kolejnym krokiem w definicji metra było powiązanie go z długością drogi przebytej przez falę elektromagnetyczną - światło. Aktualna definicja jednostki długości brzmi: metr jest to długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie (1/299 792 458) s.

Definicja jednostki masy nie ulega zmianie od ponad 100 lat i jest następująca:

kilogram jest to masa międzynarodowego wzorca tej jednostki masy przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres.

### Sekunda (s)

Podstawą definicji jednostki miary czasu - sekundy były do niedawna zjawiska astronomiczne związane, z ruchem obrotowym Ziemi dookoła Słońca, których okresowość występowania przyjmowano za niezmienną. Do 1954 r. sekunda stanowiła 1/86 400 część średniej doby słonecznej. Z powodu nieregularności związanych z obrotem Ziemi niepewność tak wyznaczonej sekundy osiąga rząd  $1 \cdot 10^{-7}$ . Podział doby słonecznej na sekundy dokonać można jedynie za pomocą zegarów kwarcowych bądź atomowych.

Z uwagi na niewystarczającą dokładność pomiaru czasu przyjęto nową definicję jednostki czasu, odnosząc ją do ruchu obrotowego Ziemi względem gwiazd stałych. W ten sposób określona sekunda jest 1/31 556 925,974 7 częścią roku zwrotnikowego 1900 stycznia 0 godzina 12 czasu efemeryd. Błąd wyznaczania sekundy mógł być zmniejszony do  $1 \cdot 10^{-10}$  (z zastosowaniem do podziału doby zegarów kwarcowych lub atomowych). Ta astronomiczna definicja sekundy została utrzymana, bowiem zjawiska astronomiczne są regulatorem życia człowieka. Odstępstwo od tej zasady doprowadziłoby do komplikacji wskutek przesuwania się początkowych punktów rachuby czasu - doby lub roku.



Współczesna technika wymaga jednak bardziej dokładnych pomiarów odcinków czasu. Wobec tego zdecydowano się na powiązanie sekundy astronomicznej z częstotliwością, wykorzystując naturalne wzorce mikroświata tj. własności pobudzenia cząstek i atomów pewnych pierwiastków z określoną stałą częstotliwością. W ten sposób zegar atomowy z wzorcem częstotliwości, np. cezowym, umożliwia pomiar dokładny częstotliwości przez dostrojenie się do rezonansu atomowego (oraz powielenie lub podzielenie otrzymanej częstotliwości). Niepewność dostrajania częstotliwości jest mniejsza od  $1 \cdot 10^{-12}$ . Pozostaje sprawa uzgodnienia wartości sekundy określonej przez zegar atomowy z sekundą astronomiczną i jej wpływu na bieżący czas.

W roku 1967 przyjęto nową definicję sekundy obowiązującą do dziś:

sekunda jest to czas równy 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu  $^{133}\text{Cs}$  (cezu 133).

Cezowe zegary atomowe pracują nieprzerwanie prawie od 25 lat, odmierzając czas atomowy międzynarodowy (TAI)<sup>4)</sup>, odbiegający nieco od czasu uniwersalnego (TU)<sup>5)</sup> opartego na obserwacji zjawisk astronomicznych związanych z ruchem obrotowym Ziemi i wykorzystywanym w nawigacji, ten ostatni jest korygowany co kilka lat tak, aby różnica między nimi była mniejsza od 0,9 s.

### Amper (A)

Obecnie obowiązuje następująca definicja ampera:

amper jest to prąd elektryczny nie zmieniający się, który płynie w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m (metr) od siebie

4) TAI - Temps Atomique International.

5) TU - Temps Universelle.

wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \cdot 10^{-7}$  N (niutona) na każdy metr długości.

Powyższa definicja oparta na prawie Ampere'a wzajemnego oddziaływania dwóch przewodów, w których przepływa prąd, określa teoretycznie ściśle wartość ampera, jednak realizacja praktyczna wzorca napotyka na trudności interpretacyjne z powodu abstrakcyjnych pojęć, takich jak przewody o nieskończonej długości i o znikomym małym przekroju. Ten abstrakcyjny model teoretyczny można zastąpić innym zbliżonym modelem fizycznym, zamiast nieskończone długich przewodów można przyjąć dwie cewki o skończonych wymiarach i obliczyć odpowiednie poprawki korekcyjne. Umieszczając jedną cewkę ruchomą, podwieszoną do jednego ramienia wagi równoramiennej, w drugiej cewce nieruchomej i przepuszczając przez nie prąd można zmierzyć siły wzajemnego oddziaływania tych cewek. Względny błąd odtwarzania ampera jest rzędu  $5 \cdot 10^{-6}$ .

### Kelwin (K)

Jednostką temperatury termodynamicznej w układzie SI jest kelwin definiowany następująco:

kelwin jest to  $1/273,16$  temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

Jako pierwsza istniała stustopniowa skala temperatur - skala Celsjusza oparta na dwu punktach stałych: temperaturze topnienia lodu i temperaturze wrzenia wody (obie realizowane w określonych warunkach). Punktom tym umownie nadano wartości liczbowe  $0^{\circ}\text{C}$  i  $+100^{\circ}\text{C}$ . Jedną setną tej skali przyjęto za stopień Celsjusza ( $^{\circ}\text{C}$ ). Przyjęcie tych założeń nie precyzowało zasad określania temperatur pośrednich. W związku z tym szukano takich ciał termometrycznych, których właściwości (zależne od temperatury) umiano precyzyjnie mierzyć. Są to np. rtęć (objętość) i platyna (opór elektryczny). Przyjęcie zależności matematycznej wiążącej właściwość termometryczną z temperaturą umożliwia tworzenie empirycznych skal temperatury, pozwalających określić

dowolną wartość temperatury. Jednak stosowanie ciał termometrycznych nie gwarantowało obiektywnego podziału skali. Aby uniezależnić skalę temperatury od ciała termometrycznego, postanowiono oprzeć się na zasadzie termodynamicznego obiegu Carnota związanego z pracą silnika cieplnego. Z praw termodynamiki wynika, że sprawność tego typu silnika jest niezależna od czynnika termodynamicznego i może być wyrażana przez stosunek różnicy ciepła pobranego (z grzejnika) względem ciepła oddanego (do chłodnicy) do ciepła pobranego, bądź taki sam stosunek odpowiednich temperatur termodynamicznych (w grzejniku i chłodnicy). W ten sposób można jakiegokolwiek jednemu punktowi skali termometrycznej nadać określoną wartość temperatury termodynamicznej, przez co określa się całą skalę temperatury.

Przyjmując temperaturę termodynamiczną potrójnego punktu wody do definicji kelwina nawiązano do istniejących skal i uzyskanych wartości temperatur różnych zjawisk fizycznych.

Istotne jest rozróżnianie:

- termodynamicznej temperatury punktu potrójnego wody  
 $T_{tr} = 273,16 \text{ K}$ ;
- termodynamicznej temperatury zera na skali Celsjusza  
 $T_0 = 273,15 \text{ K}$ .

Natomiast różnice temperatur można wyrażać tak w kelwinach, jak w stopniach Celsjusza (tylko wtedy  $1 \text{ K} = 1^\circ\text{C}$ ).

Do praktycznego odtwarzania termodynamicznej skali temperatur służy Międzynarodowa Praktyczna Skala Temperatury z 1968 r. (MPST<sub>68</sub>), w której przyjęto 11 punktów stałych definitywnych i 30 punktów wtórnych oraz określono metody interpolacyjne niezbędne do posługiwania się tą skalą. Na podstawie tej skali, osiągniętej w wyniku międzynarodowych uzgodnień, można otrzymać odtwarzalność pomiarów temperatury sięgającą rzędu  $1 \cdot 10^{-6}$ , lepszą niż uzyskuje się za pomocą termometru gazowego.

Od roku 1990 MPST<sub>68</sub> jest zastąpiona nową skalą MPST<sub>90</sub>, a różnice temperatur  $T_{90} - T_{68}$  wynoszą  $-5 \text{ mK}$  dla  $t_{68} = 20^\circ\text{C}$ .

i  $-25$  mK dla  $t_{68} = 100^{\circ}\text{C}$ , a punkt wrzenia wody wynosi  $99,97^{\circ}\text{C}$  a nie  $100,00^{\circ}\text{C}$ .

### Mol (mol)

Z definicji:

mol jest to liczność materii występująca, gdy liczba cząstek jest równa liczbie atomów, zawartych w masie  $0,012$  kg (kilograma)  $^{12}\text{C}$  (węgla 12).

Przy stosowaniu mola należy zawsze określić rodzaj cząstek. Mogą nimi być atomy, drobiny (cząsteczki) jony, elektrony lub inne cząstki bądź określone zespoły takich cząstek.

### Kandela (cd)

Ciało świecące wysyła promieniowanie świetlne we wszystkich kierunkach przestrzeni, tworząc strumień świetlny. Energetycznie temu strumieniowi odpowiada moc wysłanego promieniowania. Stosunek mocy do kąta bryłowego, w jakim ten strumień jest wysyłany, określa wielkość nazwana natężeniem światła lub światłością. W 1948 r. przyjęto następującą definicję kandeli: kandela jest to światłość, którą ma w kierunku prostopadłym powierzchnia  $(1/600\ 000)$  m<sup>2</sup> (metra kwadratowego) promiennika zupełnego w temperaturze krzepnięcia platyny pod ciśnieniem  $101\ 325$  Pa (paskali). Kandela tak utworzona ma niepewność rzędu 1%.

XVI Generalna Konferencja Miar w 1979 r. uchwaliła nową definicję kandeli obowiązującą obecnie:

kandela jest to światłość, jaką ma w określonym kierunku źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \cdot 10^{12}$  Hz (herców) i którego natężenie w tym kierunku jest równe  $\frac{1}{683}$  W/sr (wata na steradian).

### Radian (radian)

Radian jest to kąt płaski, zawarty między dwoma promieniami koła, wycinającymi z jego okręgu łuk o długości równej promieniowi tego koła.

### Steradian (sr)

Steradian jest to kąt bryłowy o wierzchołku w środku kuli, wycinający z jej powierzchni część równą powierzchni kwadratu o boku równym promieniowi tej kuli.

### 2.3. Jednostki miar wielkości elektrycznych układu SI i ich wzorce

Jednostki miar wielkości elektrycznych układu SI są odtwarzane praktycznie w postaci materialnych wzorców, których rodzaj i dokładność zależą od stanu rozwoju nauki i techniki. Do najczęściej odtwarzanych jednostek należą:

- 1) wolt - jednostka napięcia (siły elektromotorycznej-SEM),
- 2) om - jednostka oporu elektrycznego (rezystancji),
- 3) amper- jednostka (natężenia) prądu elektrycznego,
- 4) farad- jednostka pojemności elektrycznej,
- 5) henr - jednostka indukcyjności (wzajemnej),
- 6) wat - jednostka mocy elektrycznej.

### Wolt (V)

Jednostkę miary napięcia stałego - wolt można odtworzyć za pomocą:

- a) ogniwa elektrochemicznego - nienasyconego ogniwa Westona,
- b) wagi elektrostatycznej (elektrometru absolutnego).

Znamionowa wartość siły elektromotorycznej nienasyconego ogniwa Westona wynosi około 1, 01860 V w temperaturze otoczenia +20°C. Za pomocą precyzyjnych narzędzi pomiarowych (kompensatorów i dzielników napięć) / można odtworzyć jednostkę napięcia 1 V oraz jej podwielokrotności (od nV) i wielokrotności (do MV). Praktycznie miara napięcia jest odtwarzana z niepewnością rzędu kilku ppm w zakresie od 100 mV do 1000 V (1ppm = 0,0001%).

Ogniwa Westona charakteryzują się dużą wrażliwością na czynniki zewnętrzne, takie jak:

a) temperatura:

- współczynnik temperaturowy  $-40 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ,
- długi okres stabilizacji SEM po zmianie temperatury,
- histereza temperaturowa SEM;

b) wstrząsy, położenie i oświetlenie.

Przy zachowaniu wszelkich środków ostrożności, np. przez termostatyzację w kąpeli olejowej ( $\leq 0,001^{\circ}\text{C}$ ) grupy kilkudziesięciu ogniw Westona (odpowiednio selekcyjonowanych), tworzy się etalon<sup>6)</sup> grupowy SEM pozwalający na uzyskanie rocznej niestabilności mniejszej od 1 ppm (np.  $\approx 0,2 \text{ ppm}$ ).

Jednakże ogniwo Westona nie jest etalonem absolutnym i wymaga wyznaczenia wartości SEM przez pomiar absolutny oparty na jednostkach podstawowych układu SI. Do tego celu można wykorzystać wagę elektrostatyczną, w której napięcie stałe (w woltach) wyznacza się z zależności wiążącej mierzone napięcie, przykładane do okładek kondensatora, z siłą (w niutonach) działającą na te okładki i ich przesunięciem (w metrach) wywołanym tą siłą. W ten sposób z pomiarów masy, długości i czasu (pośrednio przyspieszenia ziemskiego) możliwe jest wyznaczenie absolutnej wartości napięcia z niepewnością rzędu 1 ppm.

Jednostki napięcia przemiennego - wolta nie odtwarza się. Stosuje się jedynie przetworniki termoelektryczne, które zasilane na przemian napięciem stałym i mierzonym napięciem przemiennym na wejściu, doprowadza się do stanu "równowagi" efektów wtórnych (tzn. do równości "skutków" - sił termoelektrycznych wywołanych na wyjściu przetwornika). Wówczas

<sup>6)</sup> Etalon - wzorzec odtwarzający zwykle jedną wartość danej wielkości z najwyższą możliwą dokładnością i spełniający funkcję kontrolnego narzędzia pomiarowego najwyższego w hierarchii układu sprawdzeń państwa.

zachodzi, w określonych warunkach otoczenia, zrównanie wartości skutecznej napięcia przemiennego z wartością napięcia stałego. W ten sposób odtwarza się wartość 1 V z niepewnością mniejszą od 0,01% dla prądów sinusoidalnych małej częstotliwości (do 100 kHz). Zakres w ten sposób odtwarzanych napięć wynosi od 0,1 do 100 V, a niepewność rośnie ze wzrostem wartości napięcia i częstotliwości nawet do kilku setnych procenta ( $< 100$  MHz).

### Om ( $\Omega$ )

Jednostkę miary oporu elektrycznego (ściśle rezystancji dla prądu stałego i małej częstotliwości  $< 10$  kHz) - om odtworzyć można za pomocą etalonów:

- a) drutowych,
- b) pojemnościowych lub indukcyjnych.

Drutowe etalony oporu dla prądu stałego są wykonywane w postaci cewek uzwojonych drutem ze stopu miedzi (86% Cu), manganu (12% Mn) i niklu (2% Ni), zwanego manganinem. Siła termoelektryczna (STE) manganinu względem miedzi jest mała i wynosi  $-0,6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , natomiast temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR) wynosi  $(-5 \pm +25)$  ppm/ $^\circ\text{C}$  w pobliżu  $+20^\circ\text{C}$  i w znacznym stopniu (przebieg paraboliczny) zależy od procesu produkcji. Obecnie wykorzystywany jest inny stop oporowy, który, jak np. Zeranol (88% Cu, 7% i 5% Ge), posiada nieco większą STE względem miedzi  $(-1,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$ , natomiast TWR wynosi  $(-3 \pm +3)$  ppm/ $^\circ\text{C}$  i w znacznie mniejszym stopniu - w porównaniu z manganinem - zależy od procesu produkcji.

Drutowe etalony oporu dla prądu przemiennego (do 100 kHz) są wykonywane w postaci zwojów drutu oporowego ukształtowanych w proste figury geometryczne, których parametry rezystywne (indukcyjność i pojemność) można łatwo obliczyć na podstawie ich wymiarów geometrycznych. Są to tzw. etalony oporu o liczalnych parametrach reaktancyjnych.

Dzięki odpowiedniej obróbce technologicznej w czasie wykonania oraz przechowywaniu w kąpeli olejowej ze stabili-

zaczęciem temperatury drutowe etalony oporu cechują się wysoką stabilnością długoterminową rzędu 1 ppm/rok oraz IWR mniejszym od 0,5 ppm/°C. Etalon tego rodzaju nie jest etalonem absolutnym.

Absolutny pomiar oporu jest dokonywany przez pomiar częstotliwości i pojemności (obliczeniowego kondensatora Thompsona-Lamparda - materialnego odtworzenia podwielokrotności farada  $\approx 0,4$  pF) lub indukcyjności (wzajemnej obliczeniowego induktora). W ten sposób realizowany jest etalon oporu biernego (dla prądu przemiennego m.cz.), którego wartość jest następnie przenoszona, za pomocą specjalnych mostków, na drutowe etalony oporu (odtworzające opór czynny).

Niepewność wyznaczonej w ten sposób wartości oma osiąga z zastosowaniem kondensatora (o pojemności obliczonej z długości) rząd 0,1 ppm oraz 2 ppm z wykorzystaniem induktora.

Lata siedemdziesiąte przyniosły nowe rozwiązania technologiczne w wykonaniu etalonów oporu. Zastosowanie cienkich warstw (folii) specjalnych stopów metali, nakładanych na izolacyjne podłoże, pozwala na konstrukcję etalonów oporu dla prądu stałego i przemiennego o bardzo małym IWR (rzędu  $\pm 1$  ppm/°C), dużej stabilności długoterminowej (rzędu kilku ppm na rok) oraz małych składowych resztkowych (indukcyjność  $< 80$  nH i pojemność  $< 0,5$  pF).

### Amper (A)

Jednostkę miary prądu stałego - amper można odtworzyć przez zastosowanie:

- a) wagi prądowej,
- b) prawa Ohma.

Waga prądowa realizuje jednostkę miary prądu elektrycznego przez porównanie siły wzajemnego oddziaływania elektrodynamicznego dwu współosiowych cewek, przewodzących prąd, z siłą wytwarzaną przez wzorzec masy. Sposób ten nawiązuje



do wyidealizowanej definicji ampera (podanej w p. 2.2) przyjętej w układzie SI. Osiągnięta dość duża dokładność pomiaru prądu rzędu kilku ppm jest okupiona dość zmuśnymi pomiarami (w tym skomplikowaną analizą wymiarów i położenia cewek) długości i masy oraz wyznaczeniem przyspieszenia ziemskiego w miejscu pomiaru.

Z prawa Ohma wartość prądu można wyznaczyć przez pomiar napięcia (np. kompensatorem względem etalonu SEM) na zaciskach etalonu oporu elektrycznego przy zasilaniu go z ultrastabilnego źródła napięcia stałego. Zależnie od osiągniętej dokładności absolutnego pomiaru napięcia i oporu niepewność wyznaczenia prądu tą metodą sięgać może rzędu kilkunastu ppm.

#### Farad (F)

Jednostką miary pojemności elektrycznej - farad odtworzyć można za pomocą etalonu pojemności - kondensatora liczalnego. Kondensator tego typu ma prosty kształt geometryczny, np. w postaci równoległych prętów - elektrod, pozwalających na obliczenie pojemności z wymiarów konstrukcyjnych kondensatora. Dokładność obliczenia wartości pojemności zależy więc od dokładności wyznaczenia wymiarów i znajomości stałej dielektrycznej próżni. Zrealizowane w latach sześćdziesiątych prętowe kondensatory, zbudowane z uwzględnieniem prawa Lampa (o równowadze pojemności cząstkowych wewnątrz zamkniętych powierzchni cylindrycznych) są etalonami absolutnymi. Ich pojemność zależy praktycznie jedynie od jednego wymiaru - długości. Kondensator prętowy, wyposażony najczęściej w cztery elektrody umieszczone pionowo wewnątrz zamkniętego cylindrycznego ekranu, ma znamionową pojemność elektryczną równą 0,25 pF wyznaczoną z bardzo dużą dokładnością rzędu  $\pm 0,05$  ppm. Ta mała wartość pojemności jest przenoszona na mikowe wzorce pojemności (10 i 100 pF) za pomocą transformatorowych mostków pojemności z precyzją rzędu  $\pm 1 \cdot 10^{-9}$  dla małych częstotliwości ( $< 10$  kHz). Zrealizowany w ten sposób

etalon pojemności jest etalonem absolutnym, odtwarzającym w sposób klasyczny najdokładniej jednostkę miary spośród wszystkich wielkości elektrycznych.

### Henr (H)

Henr jest jednostką miary, którą można odtworzyć za pomocą liczalnych etalonów indukcyjności własnej lub wzajemnej dla dość małych częstotliwości ( $\leq 150$  Hz). Etalony te są wykonywane w postaci cewek (o optymalnej konstrukcji), uzwojonych na karkasach o odpowiednio stabilnych parametrach i znanych dokładnie wymiarach. Ich indukcyjność jest obliczana z zależności teoretycznych podanych przez Snowa. Liczalne etalony indukcyjności są więc etalonami absolutnymi.

Etalon indukcyjności własnej jest realizowany, np. w postaci solenoidu, nawiniętego przewodem miedzianym (o średnicy  $\approx 1$  mm) tworzącym linię gwintową (o skoku 1 mm), o średnicy 30 cm i długości 35 cm. Obliczona indukcyjność własna takiego solenoidu wynosi około 18 mH, a niedokładność obliczeń jest rzędu  $\pm 5$  ppm.

Liczalne etalony indukcyjności własnej są obecnie zastępowane przez liczalne etalony indukcyjności wzajemnej z uwagi na możliwość użycia dokładniejszych wzorów obliczeniowych oraz metod pomiarowych. Etalon indukcyjności wzajemnej jest zbudowany w postaci dwu szeregowo połączonych cylindrycznych cewek, umieszczonych jedna w drugiej z możliwością ich wzajemnego przesunięcia. Zachowanie dużej precyzji wykonania uzwojeń z zastosowaniem materiałów o odpowiednio stabilnych parametrach w funkcji temperatury), pozwala na uzyskanie dużej dokładności obliczeń indukcyjności wzajemnej (10 mH) rzędu  $\pm 1$  ppm.

Zależnie od przeznaczenia etalonów indukcyjności różne są wartości indukcyjności i zakresy częstotliwości oraz ich rozwiązania konstrukcyjne. Uwidacznia się to szczególnie przy konstrukcji etalonów przeznaczonych do określania absolutnej wartości rezystancji.

Wat (W)

Jednostkę miary mocy elektrycznej - wat można odtworzyć przez porównanie jej z jednostką mocy mechanicznej za pomocą wagi Kibble'a (podobnej w działaniu do wagi prądowej), w dwóch etapach. Zastosowano jedną ruchomą cewkę przewodzącą prąd, umieszczoną w silnym polu magnesu stałego (dzięki temu uniknięto, wymaganego przy wadze prądowej, dokładnego wymiarowania cewki). Najpierw, w pierwszym etapie (statycznym) eksperymentu, siła wytworzona przez prąd  $I$  w cewce zawieszonoj na pierwszym ramieniu wagi jest równoważona wzorcem masy  $M$ , zawieszonym na drugim ramieniu wagi. Oznacza to, że równoważona jest siła  $Mg = k_1 I$  niutonów, gdzie:  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $k_1$  - stała związana z natężeniem pola magnetycznego, geometrią cewki i innymi parametrami. Następnie, w drugim etapie (dynamicznym) eksperymentu, cewka porusza się pionowo w stałym polu magnetycznym ze znaną prędkością  $v$ , wytwarzając, w otwartym obwodzie elektrycznym cewki, napięcie  $U = k_2 v$  woltów. Z zasady konstrukcji (ta sama cewka)  $k_1 = k_2$ , co w rezultacie daje równość obu rodzajów mocy  $U \cdot I = Mg \cdot v$  w watach. W przypadku dostępności rezystora  $R$  kalibrowanego względem obliczeniowego kondensatora, równość powyższą można zapisać w następującej postaci:  $U^2 = Mg \cdot v \cdot R$ . Eksperymenty te pozwalają więc na odtworzenie jednostki miary SEM z najwyższą (na świecie) dokładnością rzędu  $\pm 0,1$  ppm, umożliwiającą kalibrację ogniw Westona wchodzących w skład grupowego wzorca SEM w NPL<sup>7)</sup> w Wielkiej Brytanii.

Nowe atomowe etalony wielkości elektrycznych

Odkrycia współczesnej fizyki, takie jak efekt Josephsona i kwantowy efekt Halla, pozwalają na powiązanie jednostek miar wielkości elektrycznych - wolta i oma z wartościami

<sup>7)</sup> National Physical Laboratory - narodowe laboratorium fizyczne.

stałych fizycznych zależnych, w aspekcie mikroskopowym, jedynie od praw natury na poziomie atomu.

W wyniku wieloletnich międzynarodowych prac metrologicznych doprowadzono w latach osiemdziesiątych do otrzymania nowych wartości wolta i oma, wprowadzonych następnie jako obowiązujące od 1 stycznia 1990 r. nowe jednostki miar napięcia i rezystancji w układzie SI.

### Efekt Josephsona

Efekt Josephsona (dla prądu przemiennego i stałego) występuje w obwodzie (zwanym złączem Josephsona), złożonym z dwóch nadprzewodników oddzielonych bardzo cienką (1 nm) warstwą izolacyjną, ochłodzonym poniżej temperatury krytycznej ( $< 4$  K). Jeśli złącze jest umieszczone w zmiennym polu elektromagnetycznym o częstotliwości  $f$ , to stałoprądowa charakterystyka prądowo-napięciowa będzie nieciągła, wystąpią schodki napięcia. Napięcie na złączu  $U$  narastać będzie w stopniach równych  $f/(2e/h)$ , tzn. napięcie  $n$ -tego stopnia  $U(n) = n \cdot f/(2e/h)$ , gdzie:  $n$  - liczba całkowita ( $n \geq 1$ ),  $e$  - ładunek elektryczny elektronu,  $h$  - stała Plancka. Stosunek  $2e/h$ , zwany stałą Josephsona, oznaczany  $K_J$ , jest uniwersalną stałą niezależną od rodzaju zastosowanych nadprzewodników, temperatury, częstotliwości i mocy promieniowania pola elektromagnetycznego. Stała ta, wyznaczona z międzynarodowych komparacji 11 narodowych laboratoriów metrologicznych, przyjęta przez CIPM<sup>8)</sup> w 1988 r., wynosi  $K_J = 483597,9 (1 \pm 0,4 \cdot 10^{-6})$  GHz/V.

Współczesne układy - sieci szeregowo połączonych złączy Josephsona pozwalają na otrzymanie etalonów SEM o wartości 1 V z zastosowaniem częstotliwości około 75 GHz.

8) Comité International des Poids et Mesures - Międzynarodowy Komitet Mier.

### Kwantowy efekt Halla

Kwantowy efekt Halla zachodzi przy przenoszeniu nośników ładunków, w tzw. dwuwymiarowym gazie elektronowym, w urządzeniu półprzewodnikowym o wysokiej ruchliwości tych nośników (takim jak, np. krzemowy tranzystor polowy typu MOSFET bądź heterozłącze GaAs-AlGaAs), mającym kształt walca, znajdującym się w stałym polu magnetycznym o indukcji 10 T i oziębionym do temperatury kilku kelwinów. W takich warunkach dwuwymiarowy gaz elektronowy jest całkowicie skwantowany. Można wówczas zaobserwować, dla zadanej wartości prądu  $I$  przepływającego przez urządzenie, wystąpienie płaskich obszarów charakterystyk napięcia Halla (tak w funkcji napięcia bramki, jak i indukcji magnetycznej). Obszary te można nazwać stopniami Halla. Przy założeniu braku rozproszenia mocy w kierunku przepływu prądu, rezystancja Halla  $i$ -tego stopnia  $R_H(i)$ , definiowana jako stosunek napięcia (ściśle SEM) Halla  $i$ -tego stopnia do prądu  $I$ , jest skwantowana i wynosi  $R_H(i) = U_H(i)/I = R_K/i$ , gdzie:  $i$  - liczba całkowita,  $R_K$  - stała Klitzinga.  $R_K$  jest równa dokładnie odwrotności stałej  $h/e^2$ , gdzie:  $h$  - stała Plancka,  $e$  - ładunek elektryczny elektronu. Stała Klitzinga wyznaczona w drodze międzynarodowych komparacji przyjęta przez CIMP wynosi:  $R_K = 25812,807(1 \pm 0,2 \cdot 10^{-6}) \Omega$ .

Konsekwencją przyjętych przez CIMP ustaleń są zmiany wartości jednostek miary napięcia i rezystancji etalonów w narodowych laboratoriach metrologicznych (tabl. 3).

Tablica 3

Zmiany wartości jednostek miary napięcia i rezystancji etalonów w narodowych laboratoriach metrologicznych

| Kraj      | $\Delta E$ [ppm] | $\Delta R$ [ppm] |
|-----------|------------------|------------------|
| 1         | 2                | 3                |
| Australia | - 8,06           | - 0,09           |
| Kanada    | - 8,06           | - 3,4            |
| Chiny     | - 8,97           | - 1,50           |

cd. tablicy 3

| 1            | 2       | 3      |
|--------------|---------|--------|
| Francja      | - 6,741 | - 0,66 |
| RFN          | - 8,06  | - 0,56 |
| Włochy       | - 8,06  | + 0,3  |
| Japonia      | - 8,06  | -      |
| Szwecja      | - 7,3   | - 1,7  |
| Wk. Brytania | - 8,06  | - 1,61 |
| USA          | - 9,264 | - 1,69 |
| ZSRR         | - 3,565 | - 0,02 |

#### 2.4. Legalne jednostki miar nie należące do układu SI

Do zbioru legalnych jednostek obowiązujących w Polsce (oprócz podanych w pkt. 2.2. jednostek SI) należą:

- wybrane jednostki miar nie należące do układu SI, które ze względu na szerokie rozpowszechnienie lub specjalistyczny charakter zastosowań pozostawiono w użyciu (por. tabl. 4); te jednostki są definiowane na podstawie innych zjawisk niż zjawiska wykorzystywane do zdefiniowania odpowiadającym im jednostek SI, tak więc relacje między jednostkami SI i tymi jednostkami są określane na podstawie doświadczeń;
- jednostki pochodne mieszane wyrażane za pomocą iloczynów i ilorazów jednostek SI i jednostek podanych w tabl. 4 lub samych tylko jednostek wymienionych w tej tablicy; niektóre z tych jednostek mają własne nazwy; przykłady jednostek pochodnych mieszanych podano w tablicy 5;
- inne (nieliczne) jednostki miar dopuszczone przejściowo do stosowania jako legalne; jednostki te zestawiono w tablicy 6.

## Jednostki miar nie należące do układu SI

| Lp. | Wielkość           | Jednostka miary                  |            | Relacja między jednostkami   |
|-----|--------------------|----------------------------------|------------|--|
|     |                    | nazwa                            | oznaczenie |  |
| 1   | Długość, odległość | jednostka astronomiczna długości | UA, AU     | $1 \text{ UA} = 149\,600 \cdot 10^6 \text{ m}$                                   |
| 2   |                    | parsek                           | pc         | $1 \text{ pc} \approx 206\,265 \text{ UA} \approx 30857 \cdot 10^{12} \text{ m}$ |
| 3   | Masa               | tona                             | t          | $1 \text{ t} = \text{Mg} = 10^3 \text{ kg}$                                      |
| 4   | Czas               | minuta                           | min        | $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$   |
| 5   |                    | godzina                          | h          | $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$                                  |
| 6   |                    | doła                             | d          | $1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$                                 |
| 7   |                    | dzień                            |            | } jednostki kalendarzowe   |
| 8   |                    | tydzień                          |            |  |
| 9   |                    | miesiąc                          |            |  |
| 10  |                    | kwartał                          |            |  |
| 11  | rok                | a, r.                            |            |  |
| 12  | Temperatura        | stopień Celsjusza                | °C         | dla różnicy temperatur<br>$1 \text{ °C} = 1 \text{ K}$                           |
| 13  | Kąt płaski         | stopień                          | ...°       | $1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$  |
|     |                    | minuta                           | ...'       | $1' = (1/60)^\circ = \frac{\pi}{10\,800} \text{ rad}$                            |
|     |                    | sekunda                          | ...''      | $1'' = (1/60)' = \frac{\pi}{648\,000} \text{ rad}$                               |
|     |                    | grad                             | ...ᵍ       | $1^\text{ᵍ} = \frac{\pi}{200} \text{ rad}$                                       |
| 14  | Objętość           | litr                             | l, L       | $1 \text{ l} = 1(\text{dm})^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$                             |

Tablica 5

## Jednostki pochodne mieszane

| Lp.    | Wielkość                                    | Jednostka miary              |            | Relacja między jednostkami   |
|--------|---|------------------------------|------------|--|
|        |   | nazwa                        | oznaczenie |  |
| 1      | 2   | 3                            | 4          | 5  |
| 1      | Prędkość liniowa                            | kilometr na godzinę          | km/h       | $1 \text{ km/h} = (1/3,6) \text{ m/s}$   |
| 2<br>3 | Energia, praca                              | kilowatogodzina, elektrowolt | kW·h<br>eV | $1 \text{ kW}\cdot\text{h} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ J}$<br>$1 \text{ eV} \approx 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ |
| 4      | ładunek elektryczny                         | amperogodzina                | A·h        | $1 \text{ A}\cdot\text{h} = 3\,600 \text{ C}$  |
| 5      | Moc elektryczna<br>- pozorna                | wolto-<br>amper              | V·A        | $1 \text{ V}\cdot\text{A} = 1 \text{ W}$   |
| 6      | - bierna                                    | war                          | var        | $1 \text{ var} = 1 \text{ W}$  |
| 7      | Poziom (bezwzględny) mocy elektrycznej      | bel                          | B, Bm      | $1 \text{ Bm} \approx 0,01 \text{ W} = 10 \text{ mW}$  |
| 8      | Poziom (bezwzględny) napięcia elektrycznego | bel                          | B, Bu      | $1 \text{ Bu} \approx \sqrt{6} \text{ V} \approx 2,449 \text{ V}$  |
| 9      | Poziom (bezwzględny) ciśnienia akustycznego | bel                          | B          | $1 \text{ B} \approx \sqrt{10 \cdot 2} \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$   |



| 1  | 2   | 3               | 4      | 5  |
|----|---|-----------------|--------|--|
| 10 | Poziom głośności                            | fon             | fon    |  |
| 11 | Interwał częstotliwości                     | oktawa          | oktawa | 1 oktawa $\hat{=}$ $[(f_2/f_1) = 1]$   |
| 12 |   | dekada          | dekada | 1 dekada $\hat{=}$ $[(f_2/f_1) = 10]$<br>$f_2 > f_1$ wartości częstotliwości |
| 13 | Stosunek dwóch wartości tej samej wielkości | jedność         | 1      |  |
| 14 |   | procent         | %      | 1 % = 0,01 = $1 \cdot 10^{-2}$   |
| 15 |   | promil          | ‰      | 1 ‰ = 0,001 = $1 \cdot 10^{-3}$  |
| 16 |   | część milionowa | ppm    | 1 ppm = 0,000 001 = $1 \cdot 10^{-6}$  |
| 17 | Ilość informacji                            | bit             | bit    | 1 bit = $(P = 1/2)$<br>P - prawdopodobieństwo zdarzenia                      |
| 18 | Strumień informacji                         | bit na sekundę  | bit/s  |  |

Tablica 6

Inne jednostki miar dopuszczone przejściowo  
do stosowania jako legalne

| Lp.                          | Wielkość  | Jednostka miary  |                | Relacja między jednostkami  |
|------------------------------|---|------------------|----------------|---|
|                              |   | nazwa            | oznaczenie     |   |
| 1                            | Długość, odległość                                  | mila morska      | n mile         | 1 n mile $\approx$ 1852 m   |
| 2                            | Prędkość liniowa                                    | węzeł            | kn             | 1 kn = 1 n mile : 1 h   |
| 3                            | Prędkość obrotowa                                   | obrót na sekundę | obr/s          | 1 obr/s = $1 \text{ s}^{-1} = \text{r/s}^*$   |
| 4                            |   | obrót na minutę  | obr/min        | 1 obr/min = $(1/60) \text{ s}^{-1} = \text{r/min}^*$  |
| 5                            | Poziom (bezwzględny) napięcia lub mocy elektrycznej | neper            | Np, Npm<br>Npu | 1 Npu $\hat{=}$ $(e \cdot \sqrt{0,6}) \text{ V}$<br>1 Npm $\hat{=}$ $(e^2 \cdot 10^{-3} \text{ W})$<br>$e \approx 2,71 \dots$ |
| *) oznaczenia międzynarodowe |   |                  |                |   |

### 2.5. Zasada tworzenia i pisowni wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar

Wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar SI, tworzone w systemie dziesiętnym, są wyrażane przez dołącza-

nie (odpowiednio) do nazw lub oznaczeń jednostek miar przedrostków lub ich oznaczeń wyrażających mnożniki dziesiętne. Zestawienie tych przedrostków i ich oznaczeń przedstawiono w tabelicy 7.

Tabela 7

Zestawienie nazw i oznaczeń przedrostków dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności

|                   | Przedrostek | Oznaczenie | Mnożnik                                     |
|-------------------|-------------|------------|---|
| wielokrotności    | eksa        | E          | $10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$ |
|                   | peta        | P          | $10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$      |
|                   | tera        | T          | $10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$           |
|                   | giga        | G          | $10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$                   |
|                   | mega        | M          | $10^6 = 1\ 000\ 000$                        |
|                   | kilo        | k          | $10^3 = 1\ 000$                             |
|                   | hekto       | h          | $10^2 = 100$                                |
|                   | deka        | da         | $10^1 = 10$                                 |
| podwielokrotności | decy        | d          | $10^{-1} = 0,1$                             |
|                   | centy       | c          | $10^{-2} = 0,01$                            |
|                   | mili        | m          | $10^{-3} = 0,001$                           |
|                   | mikro       | $\mu$      | $10^{-6} = 0,000\ 001$                      |
|                   | nano        | n          | $10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$                 |
|                   | piko        | p          | $10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$           |
|                   | femto       | f          | $10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$      |
|                   | atto        | a          | $10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$ |

Podany w tabl. 7 przedrostek (oznaczenie) dołącza się do nazwy prostej (oznaczenia) jednostki miary, umieszczając

go bezpośrednio przed nazwą (oznaczeniem) jednostki miary (bez jakiegokolwiek przerwy). Np.:

1000 metrów to 1 kilometr ( $1000 \text{ m} = 1 \text{ km}$ ),

10 tysięcznych ampera to 10 miliamperów ( $0,010 \text{ A} = 10 \text{ mA}$ ).

Podobnie do nazwy prostej (oznaczenia) jednostki miary dołącza się tylko jeden przedrostek (oznaczenie). Np.:  $10^{-9} \text{ F}$  to 1 nanofarad a nie 1 milimikrofarad ( $10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ nF}$ ,  $10^{-9} \neq 1 \text{ m}\mu\text{F}$ ).

Mnożnik wyrażony przedrostkiem (oznaczeniem) odnosi się do jednostki miary w potęgze pierwszej z wyjątkiem jednostki masy kilograma.

Wielokrotności i podwielokrotności dziesiętne kilograma wyraża się przez dołączanie przedrostków (oznaczeń) do słowa gram (oznaczenia - g), np.:  $10^{-2} \text{ kg} = 1 \text{ dag}$ ,  $10^{-3} \text{ kg} = 1 \text{ g}$ .

Podane wyżej zasady mogą być stosowane również do niektórych jednostek miar nie należących do układu SI, takich jak np. jednostka poziomu 1 dB. Zasad tych nie stosuje się do jednostek czasu.

## 2.6. Zasady stosowania oraz budowy i pisowni nazw oraz oznaczeń jednostek miar

Wszystkie jednostki podstawowe i uzupełniające SI mają swoje nazwy (por. tabl. 1), natomiast z jednostek pochodnych SI - tylko niektóre, jak np. jednostka siły - niuton, jednostka ładunku elektrycznego - kulomb itd. Inne jednostki pochodne (por. tabl. 2 i 4) podaje się w postaci wyrażen utworzonych z odpowiednich jednostek podstawowych (lub innych jednostek pochodnych), jak np. jednostka prędkości - metr na sekundę, jednostka momentu siły - niutonometr itd.

Do wyrażania legalnej jednostki miary stosuje się pełną nazwę jednostki lub jej oznaczenie, np.: godzina lub h, a nie godz.; metr lub m, a nie mtr; stopień Celsjusza lub °C, a nie stop. Cels. itp.

Pełne nazwy jednostek pisze się małą literą, nawet jeżeli nazwa pochodzi od nazwiska, piszemy niuton, amper, wat, weber, paskal, podobnie jak metr, sekunda, steradian.

Oznaczenia (symbole) jednostek miar pisze się również małymi literami (m, s, sr) z wyjątkiem oznaczeń pochodzących od nazwisk, które pisze się wielkimi literami, jak np. N (niuton), C (kulomb), A (amper), W (wat) lub tylko pierwsza litera jest wielka, jak np. Wb (weber). Należy przy tym pamiętać, że nazwy pochodzące od nazwisk przyjęto pisać fonetycznie lub spolszczone, tak jak się wymawia, przez to w wielu przypadkach polska pisownia jednostek miar odbiega od międzynarodowej, np.: niuton zamiast Newton, dżul zamiast Joule, simens zamiast Siemens, om zamiast Ohm itp.

Nazwy jednostek miar odmienia się według zasad deklinacji polskiej, np. pięć amperów, a nie pięć amper.

Po nazwach jednostek lub ich oznaczeń nie stawia się kropek. Jeżeli wyrażenie jednostki składa się z oznaczeń kilku jednostek, to między nimi stawia się kropki. W ten sposób nie ma wątpliwości czy chodzi o "m·s", czyli iloczyn metra przez sekundę, czy o ms, czyli milisekundę (tysięczną część sekundy). Jednostki wyrażające się ułamkiem innych jednostek, np. metr na sekundę, można pisać jako jedną z trzech postaci:

$$\frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad \text{m/s}, \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Mnożenie w nazwie wyrażającej iloczyn jednostek miar lub w części stanowiącej licznik ułamka wyraża się przez łącznik "o" lub "razy", przy czym łącznik "razy" stosuje się tylko wtedy, gdy łącznik "o" prowadzi do niejednoznaczności lub jest niepożądany ze względów fonetycznych, np. niutonometr ale kulomb razy metr kwadratowy na wolt, a nie kulombometr kwadratowy na wolt.

Dzielenie wyraża się przez łącznik "na", np. metr na sekundę.

Mnożenie występujące po dzieleniu (w mianowniku ułamka) wyraża się przez łączniki:

- a) "i" - gdy poprzedza ostatnią nazwę prostą występującą w nazwie złożonej;
- b) ",", (przecinek) rozdzielający kolejne nazwy proste, występujące w mianowniku, z wyjątkiem przypadku wymienionego w p.a);
- c) "o" - gdy przez zastosowanie tego łącznika uzyskuje się złożoną nazwę jednostki miary utworzoną zgodnie z zasadą określoną wyżej, np.: dżul na kilogram i kelwin, kilogram na kilowatogodzinę.

Niektóre jednostki miar nie należą do układu SI, od dawna rozpowszechnione, mają oznaczenia nie odpowiadające wyżej określonym zasadom ich budowy, a mianowicie:

|                                    |                  |
|------------------------------------|------------------|
| jednostka astronomiczna długości   | AU,UA            |
| elektronowolt                      | eV               |
| stopień (jednostka kąta płaskiego) | ...°             |
| minuta (jednostka kąta płaskiego)  | ...              |
| sekunda (jednostka kąta płaskiego) | ...''            |
| grad                               | ... <sup>g</sup> |
| rok                                | r.               |
| stopień Celsjusza                  | °C               |
| procent                            | %                |
| promil                             | ‰                |

## 2.7. Oznaczanie jednostek miar drukowanych przez urządzenia drukujące o ograniczonej liczbie znaków

Rozwój automatyzacji pomiarów i rejestracji wyników pomiarów prowadzi do powszechnego stosowania tanich urządzeń drukujących (głównie importowanych) o ograniczonej liczbie

znaków. W związku z tym Prezes Polskiego Komitetu Normalizacji, Miar i Jakości Zarządzeniem z dnia 28 kwietnia 1983 r. dopuścił, odmienne od zasad podanych w pkt. 2.5., sposoby oznaczeń legalnych jednostek miar. Oznaczenia jednostek miar i przedrostków mogą być drukowane tylko jednym z trzech sposobów:

- a) małymi i dużymi literami,
- b) tylko dużymi literami,
- c) tylko małymi literami.

W zależności od tego, w którą grupę liter alfabetu łacińskiego jest wyposażone urządzenie drukujące mogą być stosowane oznaczenia podane w tablicy 8 i 9.

Tablica 8

## Oznaczenia jednostek miar wielkości fizycznych

| Lp. | Jednostka miary |            | Oznaczenie jednostki drukowane literami |        |        |
|-----|-----------------|------------|---|--------|--------|
|     | nazwa           | oznaczenie | małymi i dużymi                         | dużymi | małymi |
| 1   | 2               | 3          | 4                                       | 5      | 6      |
| 1   | metr            | m          | m                                       | M      | m      |
| 2   | kilogram        | kg         | kg                                      | KG     | kg     |
| 3   | sekunda         | s          | s                                       | S      | s      |
| 4   | amper           | A          | A                                       | A      | a      |
| 5   | kelwin          | K          | K                                       | K      | k      |
| 6   | mol             | mol        | mol                                     | MOL    | mol    |
| 7   | kandela         | cd         | cd                                      | CD     | cd     |
| 8   | radian          | rad        | rad                                     | RAD    | rad    |
| 9   | steradian       | sr         | sr                                      | SR     | sr     |
| 10  | herc            | Hz         | Hz                                      | HZ     | hz     |
| 11  | niuton          | N          | N                                       | N      | n      |
| 12  | paskal          | Pa         | Pa                                      | PA     | pa     |
| 13  | dżul            | J          | J                                       | J      | j      |
| 14  | wat             | W          | W                                       | W      | w      |

| 1  | 2  | 3                | 4       | 5       | 6       |
|----|--|------------------|---------|---------|---------|
| 15 | kulomb                                   | C                | C       | C       | c       |
| 16 | wolt                                     | V                | V       | V       | v       |
| 17 | farad                                    | F                | F       | F       | f       |
| 18 | om                                       | $\Omega$         | Ohm     | OHM     | ohm     |
| 19 | simens                                   | S                | S, Sie  | SIE     | sie     |
| 20 | weber                                    | Wb               | Wb      | WB      | wb      |
| 21 | tesla                                    | T                | T, Te   | T, TE   | t, te   |
| 22 | henr                                     | H                | H       | H       | h       |
| 23 | lumen                                    | lm               | lm      | LM      | lm      |
| 24 | luks                                     | lx               | lx      | LX      | lx      |
| 25 | bekerel                                  | Bq               | Bq      | BQ      | bq      |
| 26 | grej                                     | Gy               | Gy      | Gy      | gy      |
| 27 | tona                                     | t                | t       | TNE, T  | tne, t  |
| 28 | minuta (czas)                            | min              | min     | MIN     | min     |
| 29 | godzina                                  | h                | h, hr   | HR      | hr      |
| 30 | doba                                     | d                | d, di   | D, DI   | d, di   |
| 31 | tydzień                                  |                  | sep     | SEP     | sep     |
| 32 | miesiąc                                  |                  | men     | MEN     | men     |
| 33 | rok                                      | a, r.            | a, ann  | ANN     | ann     |
| 34 | stopień (kąt)                            | ...°             | deg     | DEG     | deg     |
| 35 | minuta (kąta)                            | ...              | mnt     | MNT     | mnt     |
| 36 | sekunda (kąta)                           | ...              | sec     | SEC     | sec     |
| 37 | grad                                     | ... <sup>g</sup> | gon     | GON     | gon     |
| 38 | litr                                     | l                | l       | L       | l       |
| 39 | stopień<br>Celsjusza                     | °C               | Cel     | CEL     | cel     |
| 40 | hektar                                   | ha.              | ha      | HAR     | har     |
| 41 | obrót na se-<br>kundę                    | obr/s            | rev/s   | REV/S   | rev/s   |
| 42 | obrót na mi-<br>nutę                     | obr/min          | rev/min | REV/MIN | rev/min |
| 43 | jednostka as-<br>tronomiczna<br>długości | UA, AU           | ua      | UA      | ua      |



cd. tablicy 8

| 1  | 2                       | 3   | 4    | 5    | 6    |
|----|-------------------------|-----|------|------|------|
| 44 | parsek                  | pc  | prk  | PRK  | prk  |
| 45 | jednostka masy atomowej | u   | u    | U    | u    |
| 46 | dioptria                |     | dptr | DPTR | dptr |
| 47 | elektronowolt           | eV  | eV   | EV   | ev   |
| 48 | woltoamper              | V·A | VA   | VA   | va   |
| 49 | war                     | var | var  | VAR  | var  |
| 50 | bel                     | B   | B    | B    | b    |
| 51 | decybel                 | dB  | dB   | DB   | db   |
| 52 | fon                     | fon | phon | PHON | phon |
| 53 | procent                 | %   | pct  | PCT  | pct  |
| 54 | promil                  | ‰   | prm  | PRM  | prm  |
| 55 | bar                     | bar | bar  | BAR  | bar  |
| 56 | mila morska             |     | nam  | NAM  | nam  |
| 57 | węzeł                   |     | knt  | KNT  | knt  |

Tablica 9

Oznaczenia przedrostków do wyrażania dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar

| Przedrostek |            | Mnożnik   | Oznaczenie jednostki drukowane literami |        |        |
|-------------|------------|-----------|---|--------|--------|
| nazwa       | oznaczenie |           | małymi i dużymi                         | dużymi | małymi |
| 1           | 2          | 3         | 4                                       | 5      | 6      |
| eksa        | E          | $10^{18}$ | Ex                                      | EX     | ex     |
| peta        | P          | $10^{15}$ | Pe                                      | PE     | pe     |
| tera        | T          | $10^{12}$ | T, Ta                                   | T, TA  | t, ta  |
| giga        | G          | $10^9$    | G                                       | G      | g      |
| mega        | M          | $10^6$    | M, Ma                                   | MA     | ma     |
| kilo        | k          | $10^3$    | k                                       | K      | k      |
| hekto       | h          | $10^2$    | h                                       | H      | h      |
| deka        | da         | $10^1$    | da                                      | DA     | da     |

| 1     | 2     | 3          | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|------------|---|---|---|
| decy  | d     | $10^{-1}$  | d | D | d |
| centy | c     | $10^{-2}$  | c | C | c |
| mili  | m     | $10^{-3}$  | m | M | m |
| mikro | $\mu$ | $10^{-6}$  | u | U | u |
| nano  | n     | $10^{-9}$  | n | N | n |
| piko  | p     | $10^{-12}$ | p | P | p |
| femto | f     | $10^{-15}$ | f | F | f |
| atto  | a     | $10^{-18}$ | a | A | a |

### 3. WIELKOŚCI LOGARYTMICZNE STOSOWANE W TELEKOMUNIKACJI

#### 3.1. Podstawowe oznaczenia i definicje

Do opisu zjawisk fizycznych występujących w technice wykorzystuje się często wielkości logarytmiczne wyrażane logarytmem stosunku dwu jednorodnych wielkości fizycznych. Wielkość ta jest z natury rzeczy wielkością bezwymiarową. Często wielkość logarytmiczna określa liczbowo stosunek wartości określonej wielkości fizycznej do wartości przyjętej za umowną lub rzeczywistą. Wtedy wielkość ta ma swoją jednostkę miary.

W telekomunikacji z racji dużej dynamiki zjawisk stosowane są powszechnie logarytmiczne wielkości i ich specyficzne jednostki miar. Wielkości te wykorzystuje się przy określaniu wartości mocy, napięć, prądów i natężenia pola elektrycznego, ciśnienia akustycznego, mocy optycznej oraz współczynników wyrażających jakość transmisji itp., występujących przy specyfikowaniu wymagań na drogi transmisyjne, urządzenia i systemy telekomunikacyjne.

Ogólnie wielkość logarytmiczna  $a$  zapisać można jako iloczyn logarytmu, przy podstawie  $b$ , stosunku dwu wielkości  $A_1/A_2$  i współczynnika  $K$ :

$$a = K \log_b \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1)$$

Wielkość fizyczna -  $A$ , zależnie od jej związku ze strumieniem przesyłanej energii, jest wielkością wprost proporcjonalną do tej energii (np. do mocy elektrycznej) i wtedy zwana jest wielkością energetyczną -  $W$  bądź do pierwiastka kwadratowego z niej (np. do napięcia elektrycznego) i wtedy zwana jest wielkością polową -  $F$ . Każdą wielkość energetyczną  $W$  można, dla układów liniowych, przedstawić jako iloczyn dwu wielkości polowych  $F_a$  i  $F_b$  lub jako kwadrat jednej z nich. Dla tego ostatniego przypadku występują jeszcze stałe  $C_a$  lub  $C_b$ :

$$W = F_a F_b = C_a F_a^2 = C_b F_b^2 \quad (2)$$

W związku z tym otrzymujemy następujące związki między logarytmicznymi wielkościami energetycznymi  $a_W$  i polowymi  $a_F$ :

$$a_W = K_W \log_b \frac{W_1}{W_2} = 2 K_W \log_b \frac{F_1}{F_2} + K_W \log_b \frac{C_1}{C_2} \quad (3)$$

$$a_F = K_F \log_b \frac{F_1}{F_2} = \frac{1}{2} K_F \log_b \frac{W_1}{W_2} - \frac{1}{2} K_F \log_b \frac{C_1}{C_2} \quad (4)$$

$$a_W = a_F \text{ gdy } C_1 = C_2 \text{ i } K_W = (1/2)K_F.$$

Wartość dowolnej wielkości energetycznej lub polowej  $A$  por. zależność (1) można określić logarytmiczną wielkością, zwaną poziomem bezwzględnym lub absolutnym (oznaczanym literą  $p$  lub  $L$ ) wyrażanym przez logarytm stosunku wielkości  $A$  do wartości znamionowej tej wielkości  $A_n$  przyjętej za wartość odniesienia:

$$p = K \log_b \frac{A}{A_n} \quad (5)$$

Wykorzystując zależność (5) można dowolną wielkość logarytmiczną por. (1) określić przez podanie różnicy poziomów  $\Delta p$ :

$$\Delta p = K \log_b \frac{A_1}{A_n} - K \log_b \frac{A_2}{A_n} = p_1 - p_2 \quad (6)$$

gdzie:  $p_1$  i  $p_2$  - bezwzględne poziomy wielkości  $A_1$  i  $A_2$ .

Przyjmując poziom  $p_2 = p_0$  jako poziom odniesienia dla danego układu (np. drogi przesyłowej sygnałów elektrycznych) otrzymujemy następną wielkość logarytmiczną  $p_r$ , zwaną poziomem względnym lub relatywnym, równą:

$$p_r = p_1 - p_0 \quad (7)$$

Zależnie od rodzaju zastosowanych logarytmów - naturalnych, dziesiętnych lub binarnych - otrzymamy odpowiednie jednostki miar: neper (Np), bel (B) i dekada, oraz oktawa.

Neper (Np) jest logarytmem naturalnym stosunku dwu wielkości połowych:

$$a_F = (K_F \log_e \frac{F_1}{F_2}) = 1 \text{ Np}, \quad (8)$$

gdy  $F_1/F_2 = e$ ,  $e = 2,7182\dots$ ,  $K_F = 1$ .

Bel (B) jest logarytmem dziesiętnym stosunku dwu wielkości energetycznych zapisanych następująco:

$$a_W = (K_W \log_{10} \frac{W_1}{W_2}) = 1 \text{ B}, \quad (9)$$

gdy  $W_1/W_2 = 10$ ,  $K_W = 1$ .

W praktyce częściej stosowana jest dziesiętna podwielokrotność bel a decybel (dB) i  $\text{dB} = 0,1 \text{ B}$ .

Oktawa i dekada - jednostki interwału (odstępu) częstotliwości.

Oktawa jest logarytmem binarnym stosunku dwu częstotliwości:

$$a_f = (K_f \log_2 \frac{f_2}{f_1}) = 1 \text{ oktawa}, \quad (10)$$

gdy  $f_2/f_1 = 2$ .

Dekada jest logarytmem dziesiętnym dwu częstotliwości:

$$a'_f = (K'_f \log_{10} \frac{f_2}{f_1}) = 1 \text{ dekada}, \quad (11)$$

gdy  $f_2/f_1 = 10$ .

### 3.2. Bel i neper

#### 3.2.1. Tło historyczne

Zastosowanie i rozpowszechnienie telefonu, stworzyło konieczność zdefiniowania jednostki miary jakości (głośności i zrozumiałości) transmisji. W pierwszych latach XX wieku przyjęto pierwsze jednostki porównawcze określające miarę tłumienności w łączach telefonicznych. W krajach anglosaskich uznano jako wzorzec miary tłumienności - tłumienność odcinka linii kablowej o zadanych parametrach odpowiadających przeciętnej dla ówczesnych połączeń długości równej 1 mili (1609 m). Jednostkę tę nazwano milą standardowego kabla, oznaczoną "msc" lub "standard kabelmilą", po polsku milą kablową.

Na kontynencie europejskim do określenia miary tłumienności był używany tzw. współczynnik tłumienia, oznaczany symbolem " $\beta_1$ ".

Stan ten trwał do lat dwudziestych. Po pierwszej wojnie światowej w Europie zaczyna się rozwijać międzynarodowa łączność telefoniczna, natrafiając na wiele barier. Przede wszystkim brak było koordynacji między administracjami

telefonicznymi poszczególnych krajów, głównie w zakresie wyposażenia technicznego, co przy dużej różnorodności języków ograniczało łączność międzynarodową do sąsiadujących ze sobą krajów. Natomiast w USA, gdzie barier tych nie było, pracowała transkontynentalna napowietrzna linia telefoniczna New York - San Francisco. Pierwszym krokiem do pokonania tych barier było powołanie Międzynarodowego Komitetu Doradczego Dalekosiężnej łączności Telefonicznej (Comité Consultatif International des Communications Téléphoniques a Grande Distance - w skrócie CCI). Na pierwszym plenarnym spotkaniu w Paryżu zorganizowano pracę Komitetu zakładając stały sekretariat, który redagował programy pracy, powierzając wybrane zagadnienia techniczne grupom ekspertów do opracowania i przedstawienia zebraniom plenarnym Komitetu. Jednym z ważniejszych zagadnień było ustalenie wzorca "transmisji" i wybór jednej jednostki miary "transmisji". W tym samym czasie w USA wprowadzono zamiast mili kablowej nową jednostkę skuteczności transmisji telefonicznej, zwaną po prostu jednostką transmisji ("transmission unit" - w skrócie "TU") definiowaną następująco - dwie wielkości mocy różnią się od siebie o jedną jednostkę transmisji, gdy ich stosunek mocy wynosi  $10^{0,1}$ . Oznacza to, że dwie dowolne wielkości mocy różnią się o N jednostek transmisji, gdy ich stosunek wynosi  $10^N (0,1)$ , co dla danych mocy  $P_1$  i  $P_2$  można zapisać:

$$N = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{\log_{10} \frac{P_1}{P_2}}{\log_{10} 10^{0,1}} \right) \text{ TU} \quad (12)$$

W Europie jednostce "TU" przeciwstawiono jednostkę naturalną " $\beta_1$ " wyprowadzoną z równań różniczkowych opisujących zjawiska występujące w jednorodnej linii długiej. Jednostkowa tłumienność " $\beta_1$ " odpowiada wartości tłumienia prądu lub napięcia (np. 1%) na jednostkę długości przy założeniu, że długość ta jest mała w porównaniu z całkowitą długością

linii będącej w stanie dopasowania falowego. Tak więc, oznaczając przez  $N$  liczbę jednostek " $\beta_1$ ", otrzymamy:

$$N = \left( \log_e \frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 \quad (13)$$

gdzie:  $I_1$  i  $I_2$  - prądy na wejściu i wyjściu rozpatrywanej linii.

Na kolejnym czwartym spotkaniu plenarnym CCI w 1927 r. przyjęto jednostki równe logarytmom stosunku mocy lub napięć (prądów), lecz nie osiągnięto jednomyślności co do układu logarytmów. W ten sposób pojawiają się dwie jednostki miary transmisji oparte na stosunku mocy: jedna równa  $e^2$ , zaś druga równa 10.

Do określenia pierwszej z tych jednostek użyto logarytmów naturalnych (neperiańskich), a jednostkę nazwano neperem na cześć Johna Napiera (matematyka szkockiego 1550-1617, twórcy logarytmów naturalnych o podstawie  $e = 2,718..$ ). Natomiast do określania drugiej jednostki przyjęto logarytmy dziesiętne (podane przez H. Briggsa - ucznia Napiera) i nazwano ją belem od nazwiska wynalazcy telefonu A.G. Bella (1847 - 1922). Jako obowiązujące przyjęto także dziesiętne wielokrotności tych jednostek - decyneper i decybel.

Od 1927 r. kraje anglosaskie i Belgia przyjęły decybel, jako jednostkę transmisji (przy czym 1 decybel = 1 TU), zaś reszta Europy kontynentalnej przyjęła neper. Oznaczenie jednostki decybel zaczęto pisać najpierw "db", a następnie "dB", natomiast neper oznaczono literą "N", a od 1968 r. "Np" (aby nie mylić z oznaczeniem jednostki siły niutonem - "N"). W latach trzydziestych jednostka decybel rozpowszechniła się również na inne dziedziny techniki szczególnie w elektroakustyce i radiofonii. Wszystkie zalecenia i wymagania na urządzenia i aparaturę pomiarową były odtąd podawane w publikacjach powstałych później Międzynarodowych

Komitetów Doradczych: do spraw Telefonii (CCIF)<sup>9)</sup>, a następnie do spraw Telefonii i Telegrafii (CCITT)<sup>10)</sup> oraz do spraw Radiokomunikacji (CCIR)<sup>11)</sup> w obu jednostkach, tzn. w neperach (decyneperach) i decybelach.

W 1968 r. IV Zgromadzenie Plenarne CCITT ustaliło ostatecznie obowiązujące do dziś Zalecenie B.4, opublikowane w materiałach pokonferencyjnych (tzw. Białej Księdze w tomie I), co do używania jednostki miary transmisji. Poleca ono stosowanie decybelu przy zestawianiu połączeń międzynarodowych, natomiast w obszarze podległym krajowym administracjom łączności dopuszcza się stosowanie obu jednostek decybelu i nepera. Zalecenie B.4. zdecydowało o przewadze decybelu nad neperem. Z tego powodu obecnie w całej telekomunikacji występuje niepodzielnie jednostka decybel.

### 3.2.2. Podstawowe zastosowania decybelu i nepera

Do oceny jakości transmisji, stanu urządzeń i aparatury pomiarowej stosowanych w systemach telekomunikacyjnych przyjęto wiele specjalistycznych wielkości opartych na stosunku dwu, najczęściej tego samego rodzaju, wielkości fizycznych, wykorzystujących skalę logarytmiczną i jednostki decybel i neper. Oceny tej dokonuje się przez pomiar parametrów sygnałów użytecznych i zakłócających.

Podstawową wielkością związaną z powyższą oceną jest poziom definiowany w sposób następujący:

---

9) od 1924 r.

10) od 1957 r.

11) od 1927 r.

Wymienione wyżej Komitety są organizacjami powstałego w roku 1923 Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (ITU) z połączenia Międzynarodowego Związku Telegraficznego (CIT od 1865 r.) i Międzynarodowego Związku Radiotelegraficznego (CIR od 1906 r.).



Poziom - to wielkość logarytmiczna, służąca do określania stanu fizycznego w danym miejscu drogi przesyłowej, układu lub ośrodka<sup>12)</sup>, wyrażana stosunkiem dwu wartości danej wielkości, z których jedna (w liczniku ułamka) dotyczy danego (mierzzonego) miejsca drogi przesyłowej, układu lub ośrodka, a druga (w mianowniku ułamka) jest umownie przyjętą wartością odniesienia.

Poziom mocy L jest określany iloczynem odpowiedniego współczynnika (por. pkt. 3.1.)<sup>13)</sup> i logarytmu stosunku mocy (np. rzeczywistej) P mierzonej w danym punkcie układu do mocy P<sub>n</sub> przyjętej za moc odniesienia:

$$L = 10 \left( \lg \frac{P}{P_n} \right) \text{ dB} \quad L = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{P}{P_n} \right) \text{ Np} \quad (14)$$

Zastosowanie skali logarytmicznej pozwala na wyrażanie dużej dynamiki relacji wartości mocy za pomocą małych wartości liczbowych poziomu wyrażanych w decybelach lub neparach. Np. stosunek mocy równy 1 milion w zapisie logarytmicznym wynosi 60 dB lub 6,91 Np. Istotną różnicą między skalą liniową a logarytmiczną wielkości mocy jest wartość zerowa. Zero w skali liniowej oznacza brak (nieobecność) mierzonej wielkości, natomiast w skali logarytmicznej zero oznacza zrównanie mierzonej wielkości z wielkością odniesienia, tzn.  $L = 0 \text{ dB} \hat{=} P = P_n$ . Znak dodatni poziomu oznacza, że  $P > P_n$ , zaś znak ujemny - że  $P_n < P$ .

W podobny sposób wartość jednostki poziomu mocy odpowiada następującym stosunkom mocy:

$$1 \text{ dB} \hat{=} P_1/P_2 = 10^{0,1} \approx 1,259$$

$$1 \text{ Np} \hat{=} P_1/P_2 = e^2 \approx 7,39$$

12) medium transmisyjnego.

13) Współczynnik ten równy jest 10 przy stosowaniu logarytmów dziesiętnych i 1/2 przy stosowaniu logarytmów naturalnych.

Bezwzględny (absolutny) poziom mocy  $L_b$  jest to logarytmiczna wielkość stosunku mocy  $P$  mierzonej w danym punkcie układu do mocy 1 mW:

$$L_b = 10 \left( \lg \frac{P \text{ [mW]}}{1 \text{ [mW]}} \right) \text{ dBm} \quad L_b = \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{P \text{ [mW]}}{1 \text{ [mW]}} \right) \text{ Npm} \quad (15)$$

Uproszczonym (skrótowym) zapisem relacji poziomu mocy względem 1 mW jest oznaczenie jednostki poziomu bezwzględnej mocy (wg IEC) jako dB (1 mW); Np (1 mW) lub (wg CCIR i CCITT) dBm; Npm, tzn. przez dodanie przyrostka "m" od miliwata.

Zerowa wartość bezwzględnego poziomu mocy  $L_b = 0$  dBm lub 0 Npm oznacza, że wartość mocy mierzonej  $P = 1$  mW.

Względny (relatywny) poziom mocy  $L_w$  - jest to logarytmiczna wielkość stosunku mocy  $P$  mierzonej w danym punkcie układu do mocy  $P_0$  mierzonej w pewnym umownym punkcie (np. początku) układu przyjętym za punkt odniesienia:

$$L_w = 10 \left( \lg \frac{P \text{ [mW]}}{P_0 \text{ [mW]}} \right) \text{ dBr} \quad L_w = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{P \text{ [mW]}}{P_0 \text{ [mW]}} \right) \text{ Npr} \quad (16)$$

Poziom zerowy  $L_w = 0$  dBr lub 0 Npr oznacza, że  $P = P_0$ .

Poziom względny jest więc algebraiczną różnicą między poziomem bezwzględnym mocy występującej w danym punkcie układu, a poziomem bezwzględnym tej mocy w punkcie układu przyjętym za punkt ("zerowy") odniesienia.

Ze względu na fakt, że bezpośredni pomiar mocy jest bardzo kłopotliwy, mierzy się napięcie (lub prąd) na określonej rezystancji. Z metodą tą łączy się pojęcie źródła odniesienia tzw. generatora normalnego, który w stanie dopasowania falowego dostarcza moc 1 mW do rezystancji 600  $\Omega$ . Wtedy siła elektromotoryczna źródła odniesienia jest równa  $2\sqrt{0,6}$  V  $\approx$  (2 · 0,7746 V), a rezystancja wyjściowa (wewnętrzna) jest równa 600  $\Omega$ .

Wartość rezystancji 600  $\Omega$  była przyjęta przez CCIF w 1938 r. jako średnia wartość modułu impedancji falowej linii

kablowych wykorzystywanych do transmisji telefonicznych. Jako częstotliwość sygnału pomiarowego generowanego przez źródło odniesienia przyjęto w Europie 800 Hz, a w USA 1000 Hz.

Obecnie transmisje sygnałów w systemach telekomunikacyjnych realizowane są w szerokim pasmie częstotliwości od kiloherców do gigaherców na liniach i poprzez ośrodki o impedancjach falowych różnych od 600 Ω .

Bezwzględny poziom napięcia  $L_u$  określa się jako iloczyn odpowiedniego współczynnika<sup>14)</sup> i logarytmu stosunku napięcia  $U$  mierzonego w danym punkcie układu do napięcia  $\sqrt{0,6}$  V<sup>15)</sup>:

$$L_u = 20 \left( \lg \frac{U \text{ [V]}}{\sqrt{0,6} \text{ [V]}} \right) \text{ dBu} \quad L_u = \left( \ln \frac{U \text{ [V]}}{\sqrt{0,6} \text{ [V]}} \right) \text{ Npu} \quad (17)$$

Uproszczonym zapisem relacji poziomu napięcia względem napięcia  $\sqrt{0,6}$  V jest oznaczenie jednostki poziomu bezwzględnego napięcia (wg IEC) jako dB(0,775 V); Np(0,775 V) lub (wg CCIR) dBu; Npu.

Względny poziom napięcia  $L_{wu}$  jest określany przez iloczyn odpowiedniego współczynnika (jw.) i logarytmu stosunku napięcia  $U$  mierzonego w danym punkcie układu do napięcia odniesienia  $U_0$  mierzonego w pewnym umownym punkcie przyjętym za punkt odniesienia:

$$L_{wu} = 20 \left( \lg \frac{U}{U_0} \right) \text{ dBru} \quad L_{wu} = \left( \ln \frac{U}{U_0} \right) \text{ Npru} \quad (18)$$

Należy tu podkreślić, że wielkości występujące w powyższych zależnościach odnoszą się do wartości średniej mocy i wartości skutecznych napięć (prądów) sygnałów użytecznych lub zakłócających np. szumów.

14) Współczynnik ten równy jest 20 przy stosowaniu logarytmów dziesiętnych i 1 przy stosowaniu logarytmów naturalnych.

15) Napięcie to wynosi  $\approx 0,7746$  V lub w zaokrągleniu 0,775 V.

Zależnie od znamionowej impedancji falowej systemu telekomunikacyjnego wartości mocy odniesienia 1 mW odpowiada wartość napięcia na impedancji: 0,7746 V/600 Ω ; 0,3873 V/150 Ω ; 0,3521 V/124 Ω ; 0,2739 V/75 Ω ; 0,2236 V/50 Ω .

Przyjęta wartość mocy (napięcia) odniesienia 1 mW (0,7746 V) jest zbyt mała do oceny mocy w radiokomunikacji i zbyt duża do oceny sygnałów zakłócających, np. szumów. W związku z tym w obszarze różnych technik transmisji przyjęto inne wartości odniesienia, a symbole literowe je oznaczające stanowią przyrostki, które dodaje się do głównej nazwy - oznaczenia jednostki decybel. W ten sposób bezwzględne poziomy mocy lub napięcia są mierzone w:

dBm - w odniesieniu do mocy 1 mW (1 miliwata),

dBW - w odniesieniu do mocy 1 W (1 wata),

dBk - w odniesieniu do mocy 1 kW (1 kilowata),

dBV - w odniesieniu do napięcia (wartość szczytowa) 1 V (1 wolta),

dBμV - w odniesieniu do napięcia (wartość szczytowa) 1 μV (1 mikrowolta),

dBu - w odniesieniu do napięcia (wartość skuteczna) 0,7746 V.

W projektowaniu i eksploatacji systemów telekomunikacyjnych stosowane jest często pojęcie poziomu zredukowanego.

Poziom zredukowany - poziom bezwzględny w danym punkcie drogi przesyłowej, układu lub ośrodka odniesiony do punktu o poziomie względnym (relatywnym) równym zeru (0 dBr), tzn. równy algebraicznej różnicy poziomów bezwzględnego i względnego dla danego punktu drogi, układu lub ośrodka.

Zredukowany poziom mocy:

$$L_{zm} = (L_b - L_w) \text{ dBm0}, \quad (19)$$

zaś zredukowany poziom napięcia

$$L_{zu} = (L_u - L_{wu}) \text{ dBu0} \quad (20)$$

Jeżeli sygnał badany jest szumem (zakłóceniem) występującym na drodze przesyłowej użytecznych sygnałów telefonicznych, to wyznacza się: bezwzględny poziom mocy psfometrycznej (lub napięcia psfometrycznego) - uwzględniający funkcję "wagi", tzn. stopień oddziaływania zakłóceń na sygnał użyteczny w funkcji częstotliwości względem częstotliwości odniesienia 800 lub 1000 Hz. Z tego powodu odpowiednie jednostki poziomu zyskują dodatkowe oznaczenia (symbole) "p", "s" i "q" dołączane jako kolejne przyrostki dodawane do oznaczeń jednostki głównej dB. Niżej podano przykłady oznaczeń i definicji jednostek miary bezwzględnych poziomów mocy lub napięć stosowanych w Europie:

- dBm0** - jednostka poziomu mocy odniesionej do mocy 1 mW, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym mocy 0 dBr;
- dBm0p** - jednostka poziomu mocy psfometrycznej (ważonej dla transmisji telefonicznej wg zalecenia P. 53 CCITT) odniesionej do mocy 1 mW, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBr;
- dBm0s** - jednostka poziomu mocy odniesionej do mocy 1 mW, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym mocy 0 dBr, dla transmisji radiofonicznej;
- dBm0ps** - jednostka poziomu mocy psfometrycznej (ważonej dla transmisji radiofonicznej wg zalecenia P. 53 CCITT) odniesionej do mocy 1 mW, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBr;
- dBu0** - jednostka poziomu napięcia odniesionego do napięcia 0,7746 V, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBr;
- dBu0s** - jednostka poziomu napięcia odniesionego do napięcia 0,7746 V, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBrs, dla transmisji radiofonicznej;

- dBqps** - jednostka poziomu napięcia psfometrycznego (ważonego dla transmisji radiofonicznej wg zalecenia 468 CCIR) odniesionego do napięcia 0,7746 V (dotyczy wartości szczytowych napięć);
- dBqOps** - jednostka poziomu napięcia psfometrycznego (ważonego dla transmisji radiofonicznej wg zalecenia 468 CCIR) odniesionego do napięcia 0,7746 V, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBrs (dotyczy wartości szczytowych napięć);
- dBqOs** - jednostka poziomu napięcia nieważonego (dla transmisji radiofonicznej, mierzonego wg zalecenia 468 CCIR) odniesionego do napięcia 0,7746 V, zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dBrs (dotyczy wartości szczytowych napięć).

W USA do oznaczeń jednostki poziomu mocy szumów stosowane są odmienne symbole ze względu na zastosowanie innego typu filtrów ważących w mierniku szumów. Są nimi:

- dBrnO** - jednostka poziomu mocy szumu odniesionej do mocy 1 pW (sygnału 1000 Hz), zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dB<sub>r</sub> (mierzonego miernikiem szumu firmy WESTERN ELECTRIC przez filtr ważący typu 144);
- dBrnOC** - jednostka poziomu mocy szumu odniesionej do mocy 1 pW (sygnału 1000 Hz), zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dB<sub>r</sub> (mierzonego miernikiem szumu firmy WESTERN ELECTRIC przez filtr ważący typu C);
- dBaO** - jednostka poziomu mocy szumu odniesionej do mocy 3,16 pW (sygnału 1000 Hz) zredukowanego względem punktu o poziomie względnym 0 dB<sub>r</sub> (mierzonego miernikiem szumu firmy WESTERN ELECTRIC przez filtr ważący typu F1A).

Mierniki poziomu (a niekiedy i woltomierze) skalowane w decybelach lub neperach wskazują poprawnie wartość bezwzględnego poziomu napięcia. Fakt ten zaznaczają wytwórcy odpowiednim oznaczeniem na podzielnicy, np. 1 mW 600  $\Omega$  ;  $U_0 = 0,775$  V lub 0 dB  $\hat{=}$  0,775 V. Jeśli miernik bezwzględnego poziomu napięcia jest wykorzystywany do pomiarów bezwzględnych poziomów mocy na różnych obciążeniach Z, to jego wskazania należy skorygować o poprawkę równą  $10 \lg(600/Z)$  dBm lub  $0,5 \ln(600/Z)$  Npm. Niekiedy mierniki poziomu mają dodatkowy przełącznik "dB - dBm", korygujący automatycznie jego wskazanie.

Dla najczęściej spotykanych impedancji poprawka ta wynosi:

|     |                  |          |         |         |        |          |
|-----|------------------|----------|---------|---------|--------|----------|
| dla | Z =              | 600;     | 150;    | 75;     | 50;    | $\Omega$ |
|     | $10 \lg(600/Z)$  | = 0,00;  | +6,02;  | +9,03;  | +10,79 | dBm      |
|     | $0,5 \ln(600/Z)$ | = 0,000; | +0,693; | +1,040; | +12,42 | Npm.     |

Do podstawowych wielkości logarytmicznych w telekomunikacji należą również wielkości dotyczące drogi transmisyjnej, takie jak: tłumienność i wzmocność definiowane następująco.

Tłumienność, tłumienie, straty/ wzmocność, wzmocnienie, zysk (rozpatrywanej drogi transmisyjnej) - wielkość określająca własność drogi, powodująca zmniejszenie/zwiększenie natężenia przesyłanej fali, wyrażana logarytmem stosunku odpowiedniej wartości wielkości wejściowej/wyjściowej tej fali do odpowiadającej jej wartości wielkości wyjściowej/wejściowej.

W przypadku mocy tłumienność/wzmocność wyraża się następującą zależnością:

$$A_m = 10 \left( \lg \frac{P_1}{P_2} \right) \text{ dB} \qquad A_m = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{P_1}{P_2} \right) \text{ Np} \qquad (21)$$

Zgodnie z zależnością (3) tłumienność/wzmocność mocy można przedstawić za pomocą tłumienności napięć lub prądów i członu korekcyjnego związanego ze zmianą impedancji drogi przesyłowej (wejścia - "1" do wyjścia "2"):

$$A_m = \left( 20 \lg \frac{U_1}{U_2} + 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1} \right) \text{ dB} \quad A_m = \left( \ln \frac{U_1}{U_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_2}{Z_1} \right) \text{ Np} \quad (22)$$

lub

$$A_m = \left( 20 \lg \frac{I_1}{I_2} + 10 \lg \frac{Z_1}{Z_2} \right) \text{ dB} \quad A_m = \left( \ln \frac{I_1}{I_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_1}{Z_2} \right) \text{ Np} \quad (23)$$

Z zależności (6) wynika, że tłumienność/wzmocność równa jest różnicy poziomów mocy  $L_m$  bądź napięć  $L_U$  lub prądów  $L_I$  z uwzględnieniem członu korekcyjnego:

$$A_m = 10 \lg \frac{P_1 [\text{mW}]}{1 [\text{mW}]} - 10 \lg \frac{P_2 [\text{mW}]}{1 [\text{mW}]} = L_{m1} - L_{m2} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} A_m &= 20 \lg \frac{U_1 [\text{V}]}{\sqrt{0,6} [\text{V}]} - 10 \lg \frac{U_2 [\text{V}]}{\sqrt{0,6} [\text{V}]} + 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1} = \\ &= (L_{U1} - L_{U2} + 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1}) \text{ dB} \end{aligned} \quad (25)$$

Wzmocność i tłumienność są wielkościami przeciwnymi, tzn. ujemna tłumienność jest równa wzmocności i odwrotnie.

Między jednostkami tłumienności (wzmocności) decybelem i neperem zachodzą następujące relacje:

$$1 \text{ Np} \approx 8,6859 \text{ dB} \quad 1 \text{ dB} \approx 0,11513 \text{ Np} \quad (26)$$

#### Osobliwości zastosowania jednostki decybel w obliczeniach

Stosowanie jednostki decybel w obliczeniach stosunku wielkości energetycznych (mocy) lub polowych (napięć) por. zależności (3) i (4) prowadzi niekiedy do nieporozumień, o ile nie zdajemy sobie sprawy z relacji między tymi wiel-



kośćciami. Na przykład, w telekomunikacji światłowodowej określona liczba decybeli może oznaczać jednocześnie stosunek mocy optycznej na wejściu przetwornika optoelektrycznego i stosunek prądów na jego wyjściu. Dlatego też zawsze należy podawać, czego określona liczba decybeli dotyczy, zgodnie z następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} x \text{ [dB(optyczny)]} &= 10 \lg (P_{\text{opt1}}/P_{\text{opt2}}) & (27) \\ &= 10 \lg (I_1/I_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x \text{ [dB(elektryczny)]} &= 10 \lg (P_{\text{el1}}/P_{\text{el2}}) & (28) \\ &= 20 \lg (I_1/I_2) \end{aligned}$$

stąd

$$x \text{ [dB(elektryczny)]} = 2 \times \text{[dB(optyczny)]} \quad (29)$$

Rozpatrując błędy lub tolerancje, danej wielkości logarytmicznej, podawane w decybelach interesujemy się, jakim wartościom odpowiadają one w mierze liniowej, np. w procentach. Przyrost bądź zmniejszenie (spadek) danej wielkości logarytmicznej zależy od rodzaju rozpatrywanej wielkości i można go obliczyć z następujących zależności:

$$\pm \Delta p_m = 10 \lg (1 \pm \Delta \cdot 0,01) \text{ dB} \quad (30)$$

$$\pm \Delta p_u = 20 \lg (1 \pm \Delta \cdot 0,01) \text{ dB} \quad (31)$$

gdzie:  $\Delta p_m$  - przyrost wielkości logarytmicznej, ze stosunku mocy,

$\Delta p_u$  - przyrost wielkości logarytmicznej, ze stosunku napięć,

$\Delta$  - przyrost (liniowy), w procentach, stosunku mocy lub napięć.

Odwracając postawione wyżej zależności można z podanego przyrostu wielkości logarytmicznej obliczyć przyrost (liniowy) w procentach:

$$\pm \Delta_m = 100 \left( 10^{\pm \frac{\Delta p}{10}} - 1 \right) \% \quad (32)$$

$$\pm \Delta_u = 100 \left( 10^{\pm \frac{\Delta p}{20}} - 1 \right) \% \quad (33)$$

gdzie:  $\Delta_m$  - przyrost (liniowy) stosunek mocy,

$\Delta_u$  - przyrost (liniowy) stosunek napięć,

$\Delta p$  - przyrost wielkości logarytmicznej ze stosunku mocy lub napięć.

Typowe, spotykane w telekomunikacji, wartości przyrostów zestawiono w tabl. 10 i 11.

Tablica 10

Przeliczenie przyrostów liniowych na logarytmiczne

| $\Delta$ | $\Delta p_m$ | $\Delta p_u$ | $\Delta$ | $\Delta p_m$ | $\Delta p_u$ |
|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|
| %        | dB           |              | %        | dB           |              |
| +0,1     | +0,0043      | +0,0087      | -0,1     | -0,0043      | -0,0087      |
| +0,5     | +0,022       | +0,043       | -0,5     | -0,022       | -0,044       |
| +1,0     | +0,043       | +0,086       | -1,0     | -0,044       | -0,087       |
| +2,5     | +0,107       | +0,214       | -2,5     | -0,110       | -0,220       |
| +5       | +0,21        | +0,42        | -5       | -0,22        | -0,45        |
| +10      | +0,41        | +0,83        | -10      | -0,46        | -0,92        |
| +20      | +0,79        | +1,58        | -20      | -0,97        | -1,94        |
| +30      | +1,14        | +2,28        | -30      | -1,55        | -3,09        |
| +50      | +1,76        | +3,52        | -50      | -3,01        | -6,02        |
| +90      | +2,79        | +5,98        | -90      | -10          | -20          |
| +99      | +2,99        | +5,98        | -99      | -20          | -40          |

Tablica 11

Przeliczenie przyrostów logarytmicznych na liniowe

| $\Delta p$ | $\Delta_m$ | $\Delta_u$ | $\Delta p$ | $\Delta_m$ | $\Delta_u$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| dB         | %          |            | dB         | %          |            |
| +0,05      | +1,16      | +0,577     | -0,05      | -1,14      | -0,574     |
| +0,1       | +2,33      | +1,16      | -0,1       | -2,28      | -1,14      |
| +0,15      | +3,51      | +1,74      | -0,15      | -3,39      | -1,71      |
| +0,2       | +4,71      | +2,33      | -0,2       | -4,50      | -2,28      |
| +0,25      | +5,93      | +2,92      | -0,25      | -5,59      | -2,84      |
| +0,3       | +7,15      | +3,51      | -0,3       | -6,67      | -3,39      |
| +0,4       | +9,65      | +4,71      | -0,4       | -8,79      | -4,50      |
| +0,5       | +12,2      | +5,93      | -0,5       | -10,9      | -5,59      |
| +0,6       | +14,8      | +7,15      | -0,6       | -12,9      | -6,67      |

## 3.2.3. Inne zastosowania jednostki decybel

Decybel - jednostka miary wielkości logarytmicznych przyjęła się w radiokomunikacji do wyrażania wielu współczynników tworzonych jako wielkości pochodne, np.: odstęp sygnału od szumu; bezwzględne poziomy gęstości mocy na jednostkę częstotliwości, powierzchni, temperatury itp.; bezwzględny poziom natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego, zyskując niekiedy dodatkowe symbole i przyrostki:

**dB<sub>e</sub>** lub **dB(μV/m)** - jednostka bezwzględnego poziomu natężenia pola elektrycznego,

**dB<sub>c</sub>** - jednostka bezwzględnego poziomu mocy sygnału zakłócającego w odniesieniu do mocy sygnału nośnego,

**dB<sub>d</sub>** - jednostka wzmocnienia anteny w odniesieniu do dipola półfalowego,

**dB<sub>i</sub>** - jednostka wzmocnienia anteny w odniesieniu do izotropowego radiatora, tzn. takiego, który rozprasza moc równomiernie we wszystkich kierunkach.

W elektroakustyce mamy do czynienia z jeszcze innymi oznaczeniami decybel:

**dB(20 $\mu$ Pa), dBt** - jednostka bezwzględnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do ciśnienia 20  $\mu$ Pa (mikropaskali), (przyrostek "t" od pierwszej litery "two"),

**dBrap** - jednostka bezwzględnego poziomu natężenia dźwięku odniesionego do  $1 \text{ pW/m}^2$  ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ), ("rap" - "reference acoustical power" - akustyczna moc odniesienia),

**dBa, dBb, dBc** - jednostka bezwzględnego poziomu ciśnienia akustycznego (wartości skutecznej), ważonego wg zaleceń IEC krzywe A, B, C, odniesionego do ciśnienia 20  $\mu$ Pa.

Odrębnym zastosowaniem decybel jest użycie go jako jednostki przy określaniu poziomów sygnałów elektrycznych występujących przy nagrywaniu, odtwarzaniu i przesyłaniu mowy oraz muzyki. Już w latach trzydziestych zwrócono uwagę na niejednoznaczność wyników pomiarów wzmocnienia sygnałów występujących w układach transmisyjnych w radiofonii. Początkowo przyjęto skalę empiryczną, obrano subiektywny poziom odniesienia - poziom głośności mowy i muzyki - oznaczając go jako "0" na środku podzielnicy przyrządu, zwanego wolumetrem (stanowiącego pewien rodzaj miernika wysterowania). Przyrząd ten wzorcowano sygnałem sinusoidalnym, natomiast wykorzystywano do pomiaru poziomów sygnałów złożonych o dużej dynamice. Pierwotnie, dla odróżnienia od mierników poziomu stosowanych w telefonii, przyrząd ten był skalowany w jednostkach "VU" ("volume unit"), stąd nazwa wolumetr. Następnie wolumetr skalowano w decybelach, przyjmując jako moc odniesienia moc 6 mW ( $0 \text{ dBs} \hat{=} 6 \text{ mW}$ ) lub napięcie (wartość skuteczną) odniesienia na  $600 \Omega$ , tj. 1,897 V. Każdy wolumetr ma miernik wskazów-

kowy o ściśle określonych właściwościach dynamicznych, decydujących o jego właściwościach całkowitych.

#### 4. POZOSTAŁE SPECJALISTYCZNE WIELKOŚCI I ICH JEDNOSTKI

Wielkości specjalistyczne związane z przesyłaniem i magazynowaniem danych (informacji) zaliczane są od maja 1989 r. (tzn. od spotkania Grupy Roboczej 1 IEC TC 25) do wielkości nielogarytmicznych mimo stosowania logarytmu do ich wyrażania. Są to:

- 1) pojemność pamięci - wielkość określająca zdolność urządzenia służącego do przechowywania danych, wyrażana logarytmem liczby możliwych stanów tego urządzenia; logicznie pamięć jest uporządkowanym (ponumerowanym) zbiorem elementarnych komórek pamięci o określonej długości, może być więc scharakteryzowana liczbą cyfr binarnych - bitów, liczbą bajtów lub liczbą słów;
- 2) przepływność cyfrowa - wielkość określająca zdolność kanałów transmisji danych do przesyłania danych, wyrażana stosunkiem logarytmu liczby możliwych stanów w danym przedziale czasu do tego przedziału;
- 3) ilość informacji - logarytm liczby decyzji potrzebnych do wybrania danego zdarzenia spośród skończonej liczby wzajemnie wykluczających się zdarzeń.

Jednostką pojemności pamięci jest bit - odpowiadający dwu stanom, a oznaczeniem jednostki - bit. Tworzone są również jednostki wielokrotne, np. kilobit (kbit) i megabit (Mbit).

Pojemność pamięci oznaczana przez  $x$  jest równa  $(\log_2 N)$  bitów, gdzie  $N$  - liczba możliwych stanów tej pamięci. Np. dla pamięci o 512 elementach, z których każdy może

przyjmować 4 stany, liczba możliwych stanów wynosi  $4^{512}$ , stąd pojemność pamięci:

$$x = \log_2 4^{512} = \log_2 2^{1024} = 1,024 \text{ kbit} \approx 1 \text{ kbit.}$$

Podstawową porcją informacji w systemach komputerowych jest słowo maszynowe składające się z całkowitej liczby bajtów (najczęściej 8-bitowych), które określają znak, kod rozkazu lub inną logiczną jednostkę informacji.

Bajty są używane jako jednostka pojemności pamięci bądź do scharakteryzowania "mocy" (zdolności przetwarzania informacji) komputerów, zwłaszcza ich wielokrotności:

kilobajt oznaczany -  $\text{KB}^{16)}$  - 1024 bajtów = 8182 bitów =  
=  $2^{13}$  bitów

megabajt oznaczany -  $\text{MB}^{16)}$  - 1 048 576 bajtów = 8388608 bitów =  $2^{23}$  bitów,

gigabajt oznaczany -  $\text{GB}^{16)}$  - 1 073 741 824 bajtów =  
= 8 589 934 592 bitów =  $2^{33}$  bitów.

Jednostką przepływności cyfrowej (binarnej) jest bit na sekundę, a oznaczeniem - bit/s.

Przepływność binarna oznaczana przez  $y$  jest równa  $[\log_2(N_{\Delta t})/\Delta t]$  bit/s, gdzie  $\Delta t$  - przedział czasu a  $N_{\Delta t}$  - liczba możliwych stanów w tym czasie. Np. dla kanału telefonicznego przy  $N = 256$  i  $\Delta t = 125 \mu\text{s}$  przepływność binarna  $y = (\log_2 256)/125 \cdot 10^{-6}) \text{ bit/s} = 8\,000 \log_2 2^8 = 64 \text{ kbit/s}$ .

W telegrafii i powolnej transmisji danych do określenia przepływności kanału stosuje się wielkość zwaną prędkością modulacji telegraficznej i jednostkę  $\text{bod}^{17)}$ , (oznaczenie:  $\text{Bd}$ ) równą odwrotności jednostkowego odstępu czasowego,

16) Oznaczenie to jest niewłaściwe, powinno być kilobajt (kbajt), megabajt (Mbajt), gigabajt (Gbajt); jednak uwzględniając zalecenia PKNMiJ podane w pkt. 2.6 i powszechność stosowania tych symboli można używać je, o ile nie budzi to wątpliwości.

17) Od nazwiska sławnego francuskiego inżyniera J.M. Baudota (1845-1903).

dlatego 1 Bd = 1 odstęp jednostkowy na sekundę. Jeśli odstęp jednostkowy odpowiada 1 bodowi, to przepływność cyfrowa (prędkość transmisji) w bit/s jest równa prędkości modulacji telegraficznej w bodach. Np. dla jednostkowego odstępu 20 ms prędkość ta wynosi 50 Bd.

Ilość informacji -  $H_0$  można podawać w trzech różnych jednostkach zależnie od zastosowanego logarytmu:

$$H_0 = \log_2 n \text{ Sh (shannon); } H_0 = \log_{10} n \text{ hartley (hartley);}$$

$$H_0 = \log_e n \text{ NAT (naturalna jednostka informacji);}$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę wzajemnie wykluczających się zdarzeń.

Np. jeśli  $n = 4$ , to  $H_0 = \lg 4 = 2 \text{ Sh}$ ,  $H_0 = \lg 4 \approx 0,602 \text{ hartley}$

$$H_0 = \ln 4 \approx 1,386 \text{ NAT.}$$

Do wielkości specjalistycznych nielogarytmicznych mierzonych w telekomunikacji zalicza się również wielkość występującą w ruchu telefonicznym i radiotelefonicznym - natężenie (intensywność) ruchu.

Jednostką natężenia ruchu jest erlang<sup>18)</sup> (oznaczenie E) - odpowiadający natężeniu takiego ruchu, w którym istnieje średnio jedno połączenie. Np. natężenie ruchu wynosi 5 E, jeśli w ciągu godziny istnieje 100 połączeń 3 - minutowych lub 25 połączeń 12 - minutowych itp.

#### WYKAZ LITERATURY

1. Belecki N.B, Dziuba R.F, Field B.F, Taylor B.N. Guidelines for Implementing the New Representations of the Volt and Ohm Effective January 1, 1990, NIST Technical Note 1263, June 1989.

---

18) Od nazwiska duńskiego matematyka A.K.Erlanga (1878-1929), który opracował naukowo teorię ruchu telefonicznego.

2. CCIR: XVIIth Plenary Assembly Düsseldorf, 1990. Documents CMV 1006, 1010, 1012, 15 December 1989.
3. Dudziwicz J. i inni: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. WKT, Warszawa 1982.
4. Germer H., Wefers N.: Messelektronik Bd. 1. Hüthig Verlag, Heidelberg 1985.
5. IEC: Letter symbols to be used in electrical technology. Part 3: Logarithmic quantities and units. Publ. 27 - 3. Geneva 1989.
6. PN-86/T-01011. Telekomunikacja. Poziomy wielkości fizycznych. Terminy i określenia.
7. PN-88/E-01103. Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Wielkości i jednostki logarytmiczne.
8. PN-89/E-01102. Oznaczenia wielkości i jednostek miar używanych w elektryce. Telekomunikacja i elektronika.
9. Quintas V.: The decibel. Telekommunication Journal, vol. 41, No 11, 1974.
10. Thiele A.N.: The decibel in Sound Program Transmission. Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia, vol. 9, No 1/2, March/June 1989.