

Amper - praktyczne aspekty realizacji definicji jednostki miary natężenia prądu – schemat spójności pomiarowej a użytkownicy przyrządów pomiarowych

Witold Rzodkiewicz

Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu, Główny Urząd Miar,
ul. Elektoralna 2, 00-139, Warszawa

Plan wystąpienia

1. Cel i motywacja
2. Definicja ampera w fizyce klasycznej
3. Spójność pomiarowa i zdolność pomiarowa
4. Definicja ampera w kwantowym układzie Si
5. Podsumowanie

Cel i motywacja

- Jednostki układu SI stanowią – w nieustannie rozwijającym się świecie – wspólny dla wszystkich zbiorów jednostek miary.
- Istniejące systemy jednostek wielkości fizycznych są częścią niezbędnego zestawu narzędzi nauki, nowoczesnej technologii, przemysłu i handlu międzynarodowego, więc jako dowolne narzędzia powinny odpowiadać aktualnemu stanowi techniki.
- Celem prezentacji jest przedstawienie praktycznej realizacji definicji jednostki natężenia prądu - ampera prowadzonej w GUM oraz nowej jego definicji.

Klasyczna definicja Ampera

1 amper to niezmienny się prąd elektryczny, który płynąc w dwóch równoległych, prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o znikomym małym przekroju kołowym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę równą $2 \cdot 10^{-7}$ N na każdy metr długości przewodu.

Klasyczna definicja Ampera (2)

Równania Maxwella

Postać różniczkowa:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Oznaczenia:

ρ - gęstość ładunku,

ε - przenikalność dielektryczna,

μ - przenikalność magnetyczna,

\vec{j} - gęstość prądu,

Φ_B - strumień indukcji magnetycznej,

Φ_E - strumień natężenia pola elektrycznego.

Postać całkowa:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon}$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I + \mu \varepsilon \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$$

Klasyczna definicja Ampera (3)

Prawo Ampera wiąże z sobą stały prąd I i wytworzone pole B .

$$2\pi r B = \mu_0 I \quad (1)$$

Drugie potrzebne prawo to wyrażenie na siłę, z jaką pole magnetyczne działa na prostoliniowy przewodnik o długości l :

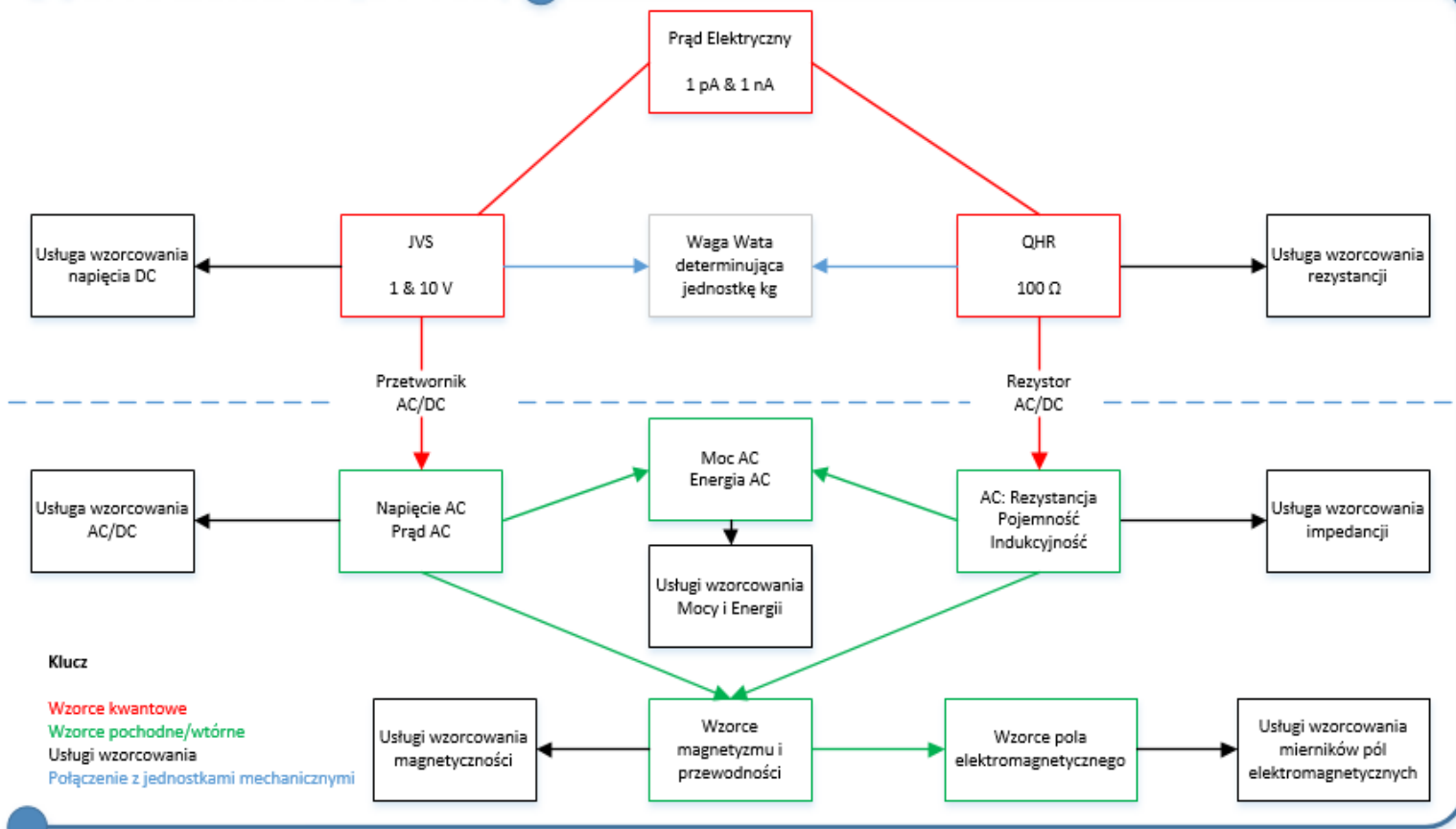
$$F = BIl \quad (2)$$

Wzór na siłę między dwoma prostoliniowymi drutami odległymi o r , ma zatem postać:

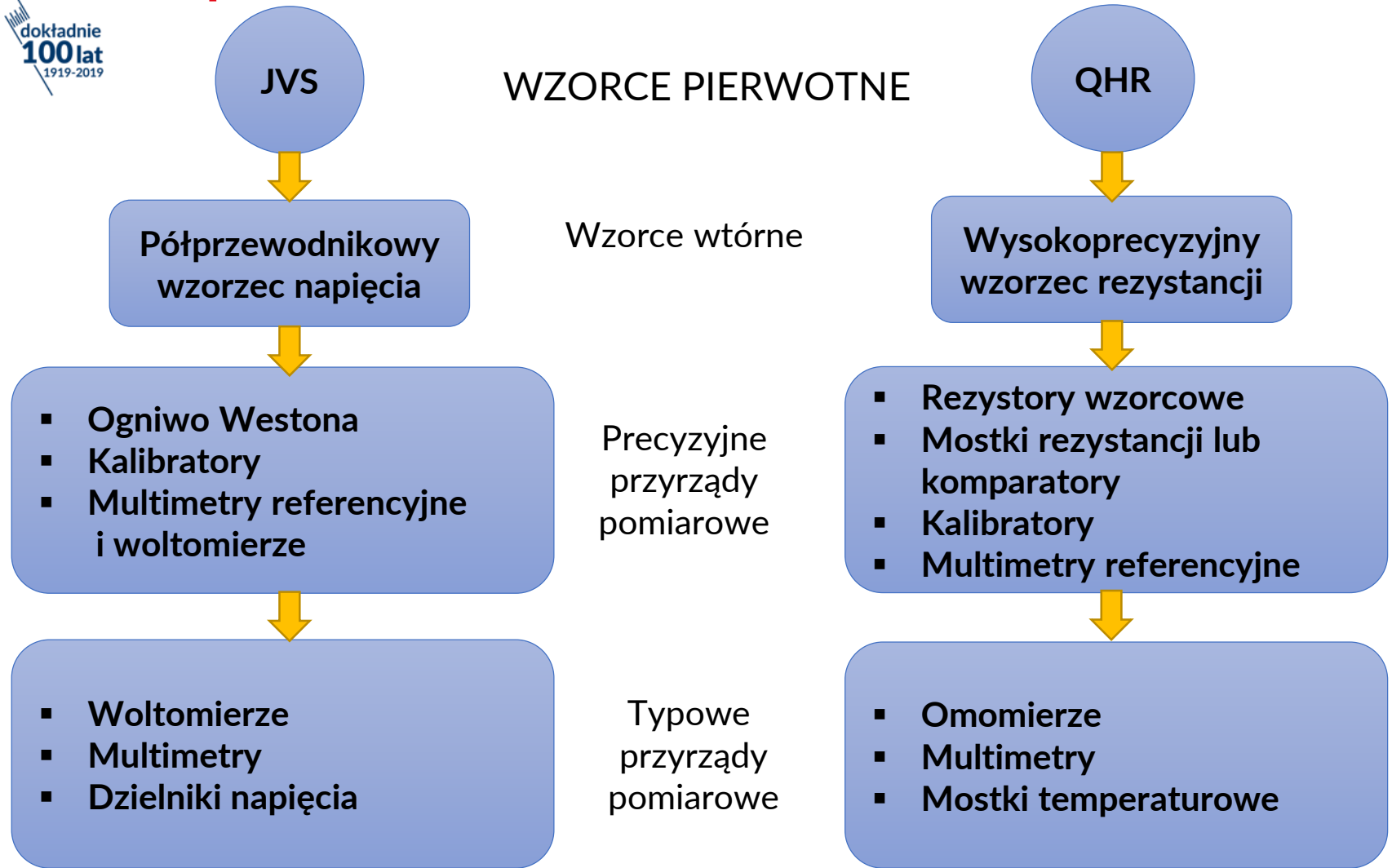
$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi r} \quad (3)$$

Spójność pomiarowa

Spójność Pomiarowa DC & LF (DC to 1 MHz)



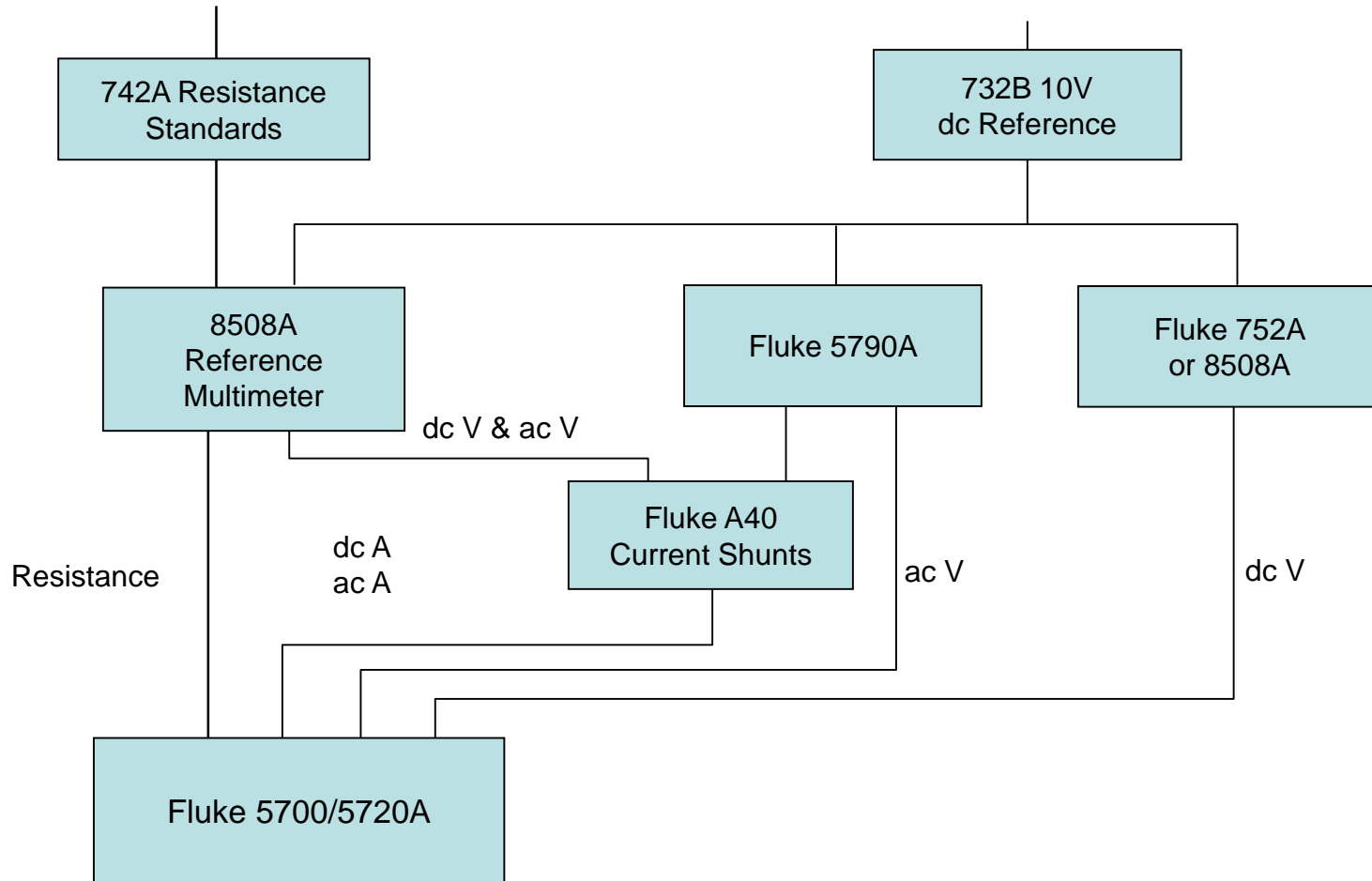
Spójność pomiarowa (2)



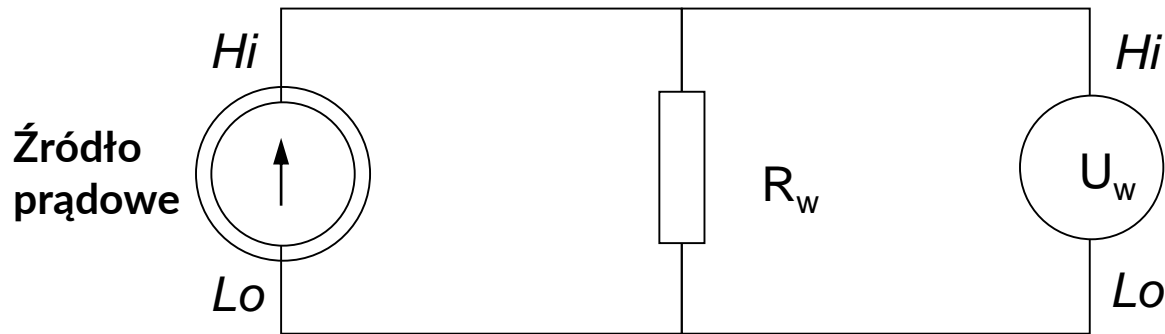
Spójność pomiarowa (3)

- Przy realizacji zasady spójności pomiarowej każdego systemu istotne jest, by łańcuch wzorcowania od wzorców najwyższego rzędu w dół, na wszystkich ogniwach transferu jednostki miary nie został przerwany.
- Spójność pomiarowa nie zawiera w sobie pojęcia dokładności, gwarantuje błędy i niepewności poszczególnych przyrządów pomiarowych z uwzględnieniem hierarchii wzorców.

Spójność pomiarowa (4)



Metoda techniczna pomiaru prądu



$$I = \frac{U_w}{R_w}$$

Zdolność pomiarowa

DC_current_sources

	Direct comparison	Drop voltage across the standard resistor
0.1 mA	-	5
100 μ A to 200 μ A	93	-
0.2 mA to 1 mA	67	-
1 mA	-	4.3
1 mA to 2 mA	330	-
2 mA to 10 mA	390	-
10 mA	-	4
10 mA to 20 mA	36	-
25 mA	-	7.3
50 mA	-	6
20 mA to 100 mA	68	-
100 mA	-	5.4
100 mA to 200 mA	55	-
0.2 A to 1 A	170	-
0.25 A	-	14
0.5 mA	-	14
1:00 AM	-	14
1 A to 2 A	120	-
2 A to 10 A	400	-
2.5 A	-	14
5:00 AM	-	14
10:00 AM	-	15
10 A to 20 A	270	-

The expanded uncertainties given in this table are expressed in μ V/A

https://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=PL&branch=EM/Field

Zdolność pomiarowa (2)

DC_current_meters

	Direct comparison	Drop voltage across the standard resistor
0.1 mA	-	5.0
0.1 mA to 0.2 mA	92	-
0.2 mA to 0.22 mA	62	-
0.22 mA to 1 mA	57	-
1 mA	-	4.3
1 mA to 2.2 mA	32	-
2.2 mA to 10 mA	43	-
10 mA	-	4
10 mA to 22 mA	34	-
22 mA to 100 mA	67	-
25 mA	-	7.3
50 mA	-	6
100 mA	-	5.4
100 mA to 200 mA	42	-
200 mA to 220 mA	39	-
0.22 A to 1 A	110	-
0.25 mA	-	14
0.5 mA	-	14
1:00 AM	-	14
1 A to 2 A	62	-
2 A to 5 A	56	-
2.5 A	-	14
5A	-	14
5 A to 10 A	420	-
10 A	-	15
10 A to 11 A	370	-
11 A to 15 A	1100	-
15 A to 20 A	1400	-

The expanded uncertainties given in this table are expressed in $\mu\text{A/A}$

Zmodyfikowana definicja ampera

- Obecnie najdokładniejsze pomiary natężenia prądu wykonywane są w sposób pośredni, przez wykorzystanie wzorców napięcia i rezystancji.
- Od wielu lat pracuje się nad kwantowym wzorcem natężenia prądu, który wytwarzać ma prąd elektryczny przez kontrolowane przepuszczenie określonej liczby elektronów na sekundę, przy wykorzystaniu odpowiedniej struktury półprzewodnikowej o rozmiarach rzędu nanometrów [1,2]

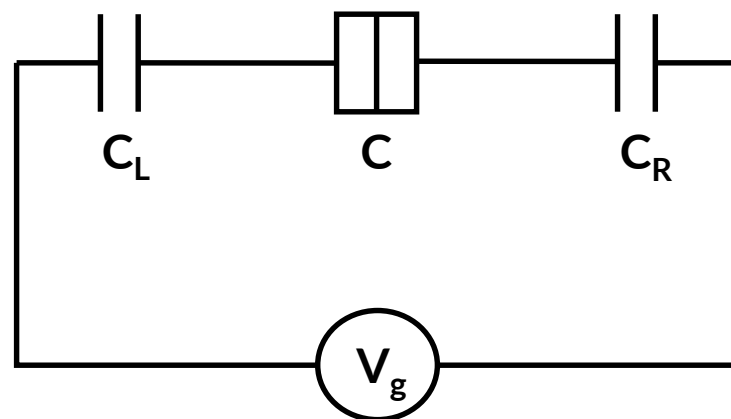
[1] B. Camarota i inni, Electron Counting Capacitance Standard with an improved five-junction R-pump. *Metrologia* 49 (2012) s. 8

[2] H. Scherer, J. Schurr and F. J. Ahlers Electron counting capacitance standard and quantum metrology triangle experiments at PTB. *Metrologia* 54 (2017) 322-338.

Zmodyfikowana definicja ampera (2)

Elektronika pojedynczego elektronu

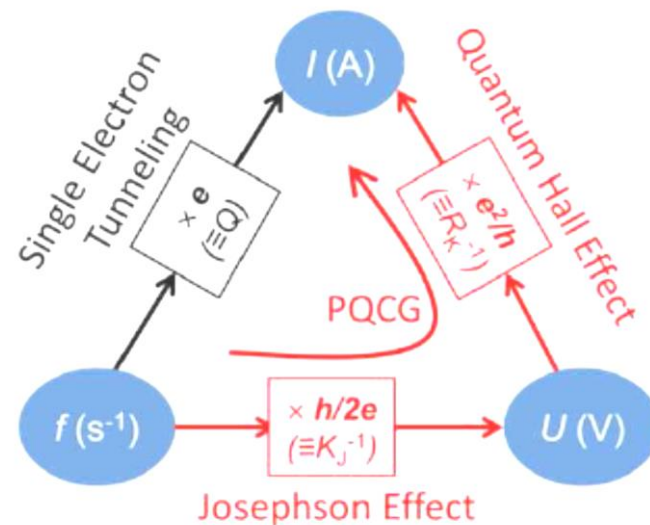
Prąd elektryczny składa się ze strumienia elektronów, zatem poprzez kontrolowanie prądu jednego elektronu w danym czasie i zdefiniowanie ładunku tego elektronu jako stałej liczby możemy wytworzyć prąd, który jest nam dokładnie znany.



J. P. Pekola and O.P. Saira Reviews of Modern Physics, Volume 85, October-December 2013, pp. 1421-1472

Zmodyfikowana definicja ampera (3)

Amper, oznaczenie **A**, jest to jednostka prądu elektrycznego w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości ładunku elementarnego e , wynoszącej $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, wyrażonej w jednostce **C**, która jest równa **A s**, gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$



Rezolucję dotyczącą m.in. redefinicji jednostki miar ampera przyjęto podczas 26 Generalnej Konferencji Miar odbywającej się w dniach 13-16 listopada 2018 r. w Wersalu pod Paryżem. Nowa definicja wejdzie w życie 20.05.2019.

Podsumowanie

- Celem referatu było przedstawienie praktycznej realizacji definicji jednostki natężenia prądu - ampera prowadzonej w GUM.
- Polepszenie dokładności wielkości elektrycznych stało się możliwe przy wykorzystaniu zjawisk kwantowych Josephsona i kwantowego efektu Halla.
- Zastosowanie tych zjawisk pozwoliło zaproponować kwantowy układ Si.