



3.3 Etaloni

Definicija enote je največkrat šele natančno formulirana naloga, **kako** enoto **realizirati**.

3.3.1 Primarni etaloni

Naprava, s katero **realiziramo** osnovno ali izpeljano enoto je **primarni etalon**.

- Ima največjo meroslovno kakovost.
- Ne sklicuje se na noben drug etalon.





Osnovna enota elektromagnetike: **amper**

- Reprodukcijska je izvedena z Ayrtonovo-Jonesovo **tokovno tehtnico** (1963).
 - aritmetična sredina 40 meritev je bila 1,018601A,
 - merilna negotovost: nekaj 10^{-6}
- Amper se zaradi **problemov** (izmere tokovne tehtnice, necentričnost tuljav in njihov položaj, zemeljski pospešek, temperatura, ...) **redko realizira** (le v vrhunskih metroloških laboratorijih).
- Amper se hrani večinoma **posredno preko razmerja napetost in upornosti**.
 - zahtevana velika časovna stabilnost.





Prva izpeljana enota elektromagnetika je **volt**

- Definicija:
 - Je potencialna razlika med dvema točkama na homogenem žičnem vodniku, v katerem je stalen tok enega ampera, porabljena moč zaradi toka pa en watt.
- **Težave so še večje** kot pri amperu (diferencialni kalorimeter),
 - negotovost: ca. 10^{-5}

Z vsako nadaljno izpeljano enoto se **negotovost večja**.

- Obstajajo pa **izjeme**: enota za induktivnost **henry** in kapacitivnost **farad**, ker je realizacija bistveno **odvisna** le **od geometrije**.





Henry in farad

- **Relativna permeabilnost in relativno dielektričnost** sta v praznem prostoru enaki 1.
- **Magnetna konstanta** je absolutno točna (posledica definicije ampera): $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
 - **Amper** je tok, ki pri prehodu skozi dva vodnika v vakuumu v medsebojni razdalji 1 metra, povzroča med njima silo $2 \cdot 10^{-7}$ newtna na meter dolžine.

$$F = lIB = l\mu_0 \frac{I^2}{2\pi d} \Rightarrow$$

$$\mu_0 = \frac{F}{l} \frac{2\pi d}{I^2} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{m}} \frac{2\pi \cdot 1\text{m}}{(1\text{A})^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$





- **Električna konstanta ε_0** je preko **svetlobne hitrosti** v vakuumu $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ absolutno točno določena z enačbo:

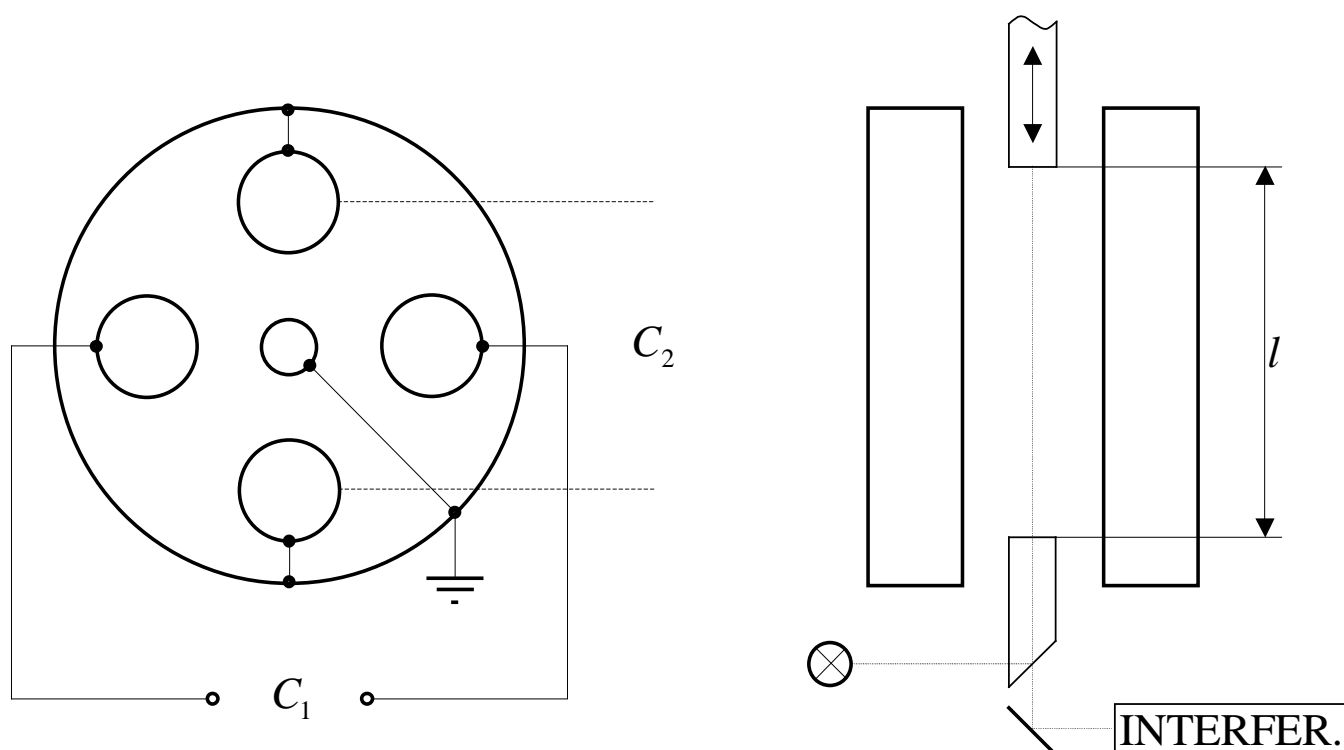
$$c^2 \mu_0 \varepsilon_0 = 1 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0}$$

- Negotovost pri realizaciji **Henrya**: ca. 10^{-6} ,
- Negotovost pri realizaciji **Farada**: ca. 10^{-7} ,





Farad realiziran s Thompson-Lampard križnim kondenz.



V kovinskem ohišju sta **dva para** nasproti ležečih elektrod (C_1 , C_2).

V sredini sta nameščeni kovinski cevi, od katerih se ena premika,

- Odvisno od razdalje l se spreminjata C_1 in C_2 .

Slika 3.1 Thompson-Lampardov križni kondenzator

Avtorja sta dokazala, da je aritmetična sredina enaka

križni kapacitivnosti:
$$C = \frac{1}{2}(C_1 + C_2) = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l$$





S pomočjo **mostičev z induktivnimi deliniki** se da **prenesti** realizirano vrednost (med 0,1 pF in 1 pF) na kondenzatorje **večjih vrednosti**.

Tudi **ohm** se da realizirati preko induktivnosti in kapacitivnost bolj točno, kot preko definicije:

- En **ohm** je električna upornost vodnika, v katerem ni lastne napetosti in v katerem povzroča stalna potencialna razlika enega volta med koncema tok enega ampera.





Volt se da realizirati načelno celo bolj točno kot amper.

- Enoto napetosti se da realizirati na podlagi merjenja sile, kapacitivnosti in razdalje (**napetostna tetnica**), ker je sila med ploščama kondenzatorja:

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial d}$$

- negotovost: ca. 10^{-6}

Da ima realizacija ampera večjo negotovost je krivda v definiciji, da je vrednost za magnetno konstanto μ_0 absolutno točna.

Ker je **realizacija** osnovnih in izpeljanih enot tako **zahtevna**, se za **prenos** in **ohranjanje** enot uporabljajo zelo **stabilna** merilna sredstva – **sekundarni etaloni**.





3.3.2 Sekundarni etaloni

Umerimo jih s pomočjo primarnih etalonov.

- Njihova **negotovost je večja.**
- Na področju **elektromagnetike** sta pomebna sekundarni etalon **napetosti in upornosti!**





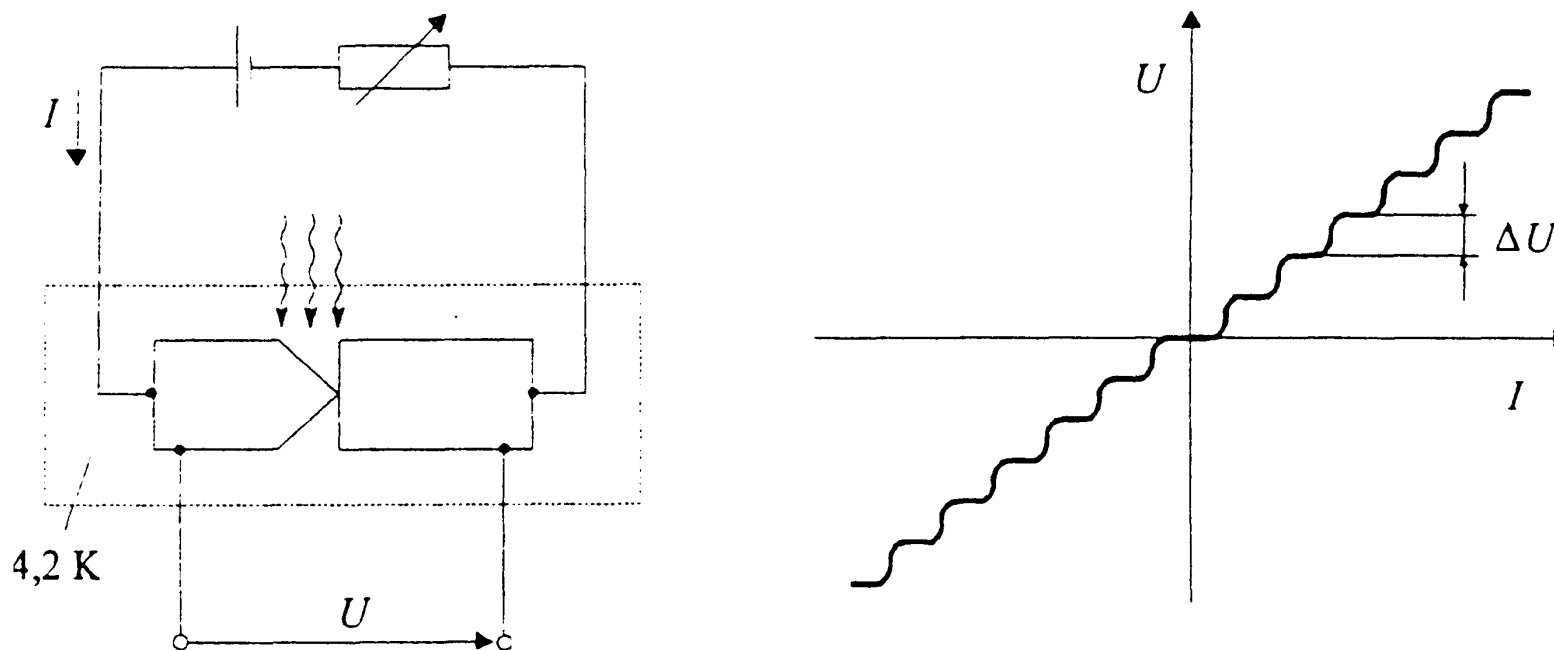
3.3.2.1 Sekundarni etaloni napetosti:

- **Westonov normalni člen,**
 - zasičena raztopina kadmijevega sulfata,
 - $U = 1,01865 \text{ V}$ pri 20° C ,
 - časovna **stalnost** : 10^{-7} na leto,
 - **povprečna vrednost** v grupo vključenih členov (10-30), je napetost sekundarnega etalona.
- **Polprevodniške diode,**
 - temperaturni koeficient $10^{-6} / \text{K}$,
 - relativno **velika** izhodna **napetost** (10 V),
 - velika dopustna **obremenitev** (10 mA),
 - časovna **stabilnost**: 10^{-6} na leto,
 - v grupi je do šest etalonov.



- **Josephsonov člen**

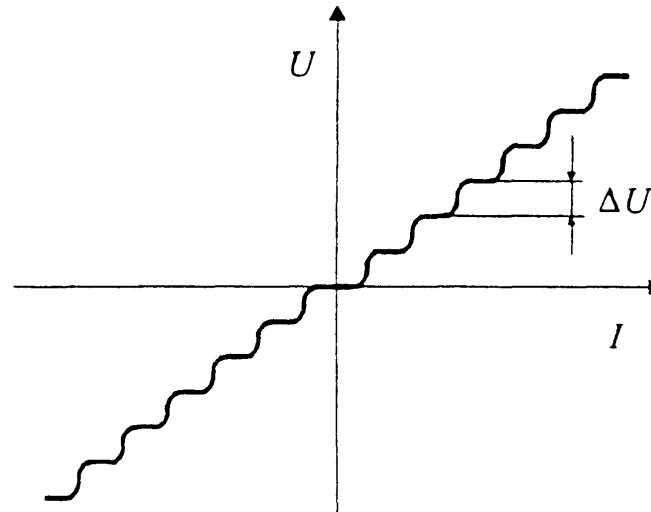
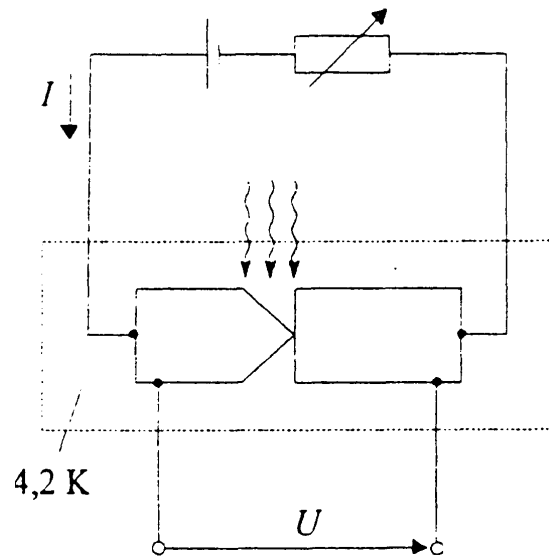
- **prevladujoč** za vzdrževanje etalona napetosti.



Slika 3.2 Josephsonov člen in njegova karakteristika

Sestavljen iz dveh šibko **sklopljenih superprevodnikov**.

Če mesto dotika (točkast) **obsevamo z mikrovalovi**, dobimo **stopničasto UI** karakteristiko.



Višina stopnic je enaka in odvisna od Plankove konstante h , osnovnega naboja e in frekvence f elektromagnetnega sevanja

$$\Delta U = \frac{h}{2e} f$$

Celotna napetost je odvisna od števila stopnic (štetje):

$$U = n \frac{h}{2e} f = n \frac{f}{K_j}$$





$$U = n \frac{h}{2e} f = n \frac{f}{K_j}$$

Josephsonova konstanta:

$$K_j = 2e/h$$

- odvisna je od negotovosti pri realizaciji ampera
- naravna konstanta,
 - neodvisna od časa, kraja in materialnih lastnosti,
- po dogovoru ji je pripisana vrednost (1990):

$$K_{j-90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$$





Stalnost **Josephsonovega vira** je 10^{-10} na leto.

- **vzdrževanje** etalona napetosti je **zelo zanesljivo**.

Višina ene stopnice UI karakteristike pri frekvenci 70GHz:

$$\Delta U = \frac{70 \text{ GHz}}{483\,597,9 \text{ GHz/V}} = 1,447484 \cdot 10^{-4} \text{ V} \approx 145 \mu\text{V}$$

- pri $n = 20$ stopnicah že dobimo napetost $U \approx 3 \text{ mV}$,
- v serijo vezanih ca. 20000 Josephsonovih členov predstavlja napetost 10 V.





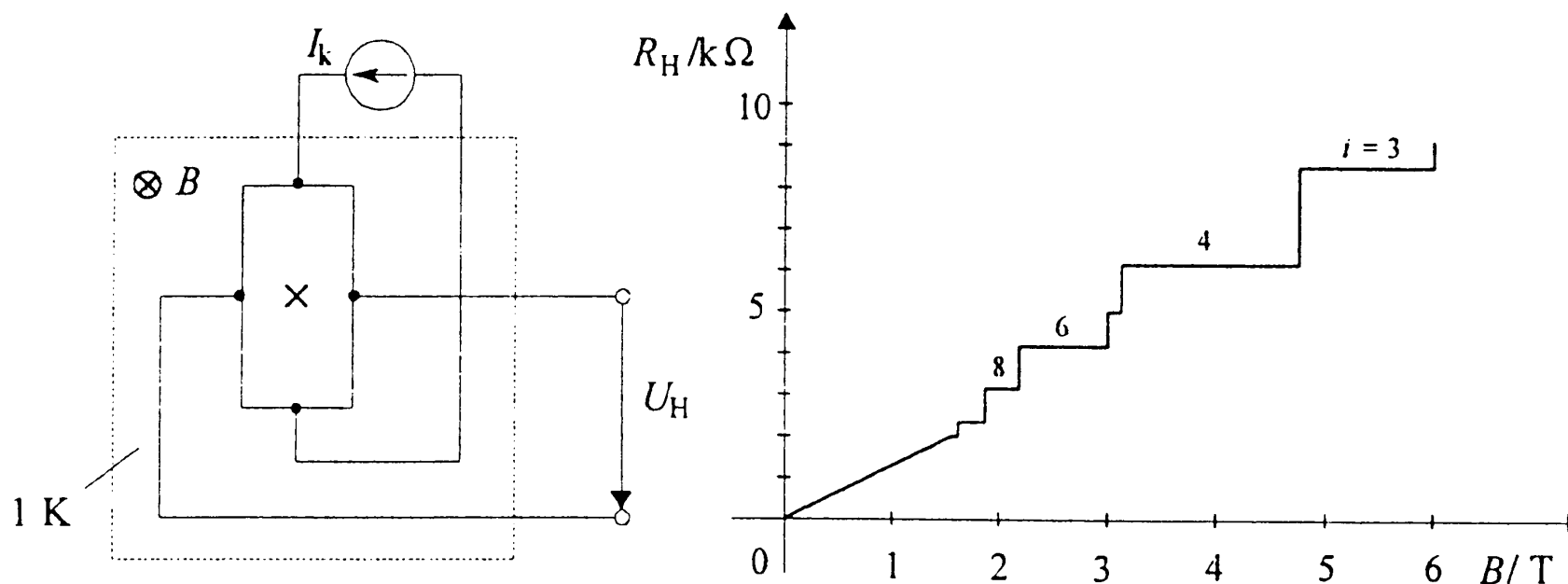
3.3.2.2 Sekundarni etalon upornosti

Tvori **grupa uporov** z upornostjo enega ohma.

- naviti z žico iz zlitine Cu-Mn-Ni (manganin, omal),
- temperaturni koeficient pod $10^{-5}/\text{K}$,
- po umetnem staranju ima grupa stalnost ca. 10^{-7} na leto.

Za vzdrževanje enote upornosti se da izkoristiti kvantiziran Hallov upor (von Klitzingov efekt).





Slika 3.3 Kvantiziran Hallov upor in njegova karakteristika

Napetost klasične Hallove sonde je:

$$U_H = \frac{1}{ned} I_k B$$

n – koncentracija nosilcev elektrine,

e – osnovni naboj,

d – debelina sonde,

I_k - krmilni tok,

B - magnetna indukcija.





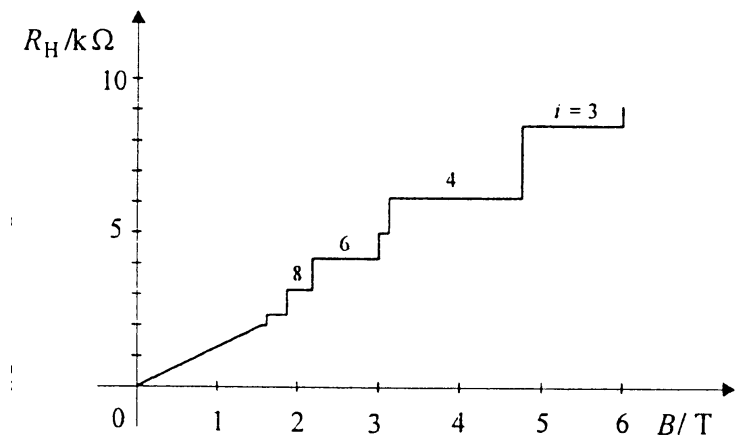
Razmerje Hallove napetosti in krmilnega toka je **Halova upornost**:

$$R_H = \frac{U_H}{I_k} = \frac{1}{ned} B$$

Če dosežemo:

- nosilci elektrine se gibljejo le v ravnini,
- $B > 2T$,
- termodinamična temperatura pod 1K;

karakteristika postane stopničasta:





Vrednost upornosti je celoštevilčni mnogokratnik **von Klitzingove konstante** $R_k = h/e^2$:

$$R_{H,i} = \frac{1}{i} \frac{h}{e^2} = \frac{R_k}{i} ; \quad i = 1, 2, \dots$$

Ker nastopata v izrazu dve naravni konstanti, je tako reproducirana enota upornosti neodvisna od časa in kraja.

- **von Klitzingove konstante** se ne da absolutno točno določiti,
 - odvisna od realizacije ampera.
 - po dogovoru (1990): $R_{k-90} = 25\,812,807\,\Omega$

Za kvantiziran Hallov upor velja, da imamo časovno zelo stabilno upornost!





3.3.3 Delovni etaloni

Za neposredno delo se uporabljajo delovni etaloni.

- Še večja negotovost kot pri sekundarnih etaloni.
- Različne vrednosti.
- Za prenos vrednosti se uporabljajo kompenzatorji in mostiči.

3.3.4 Metrološka piramida

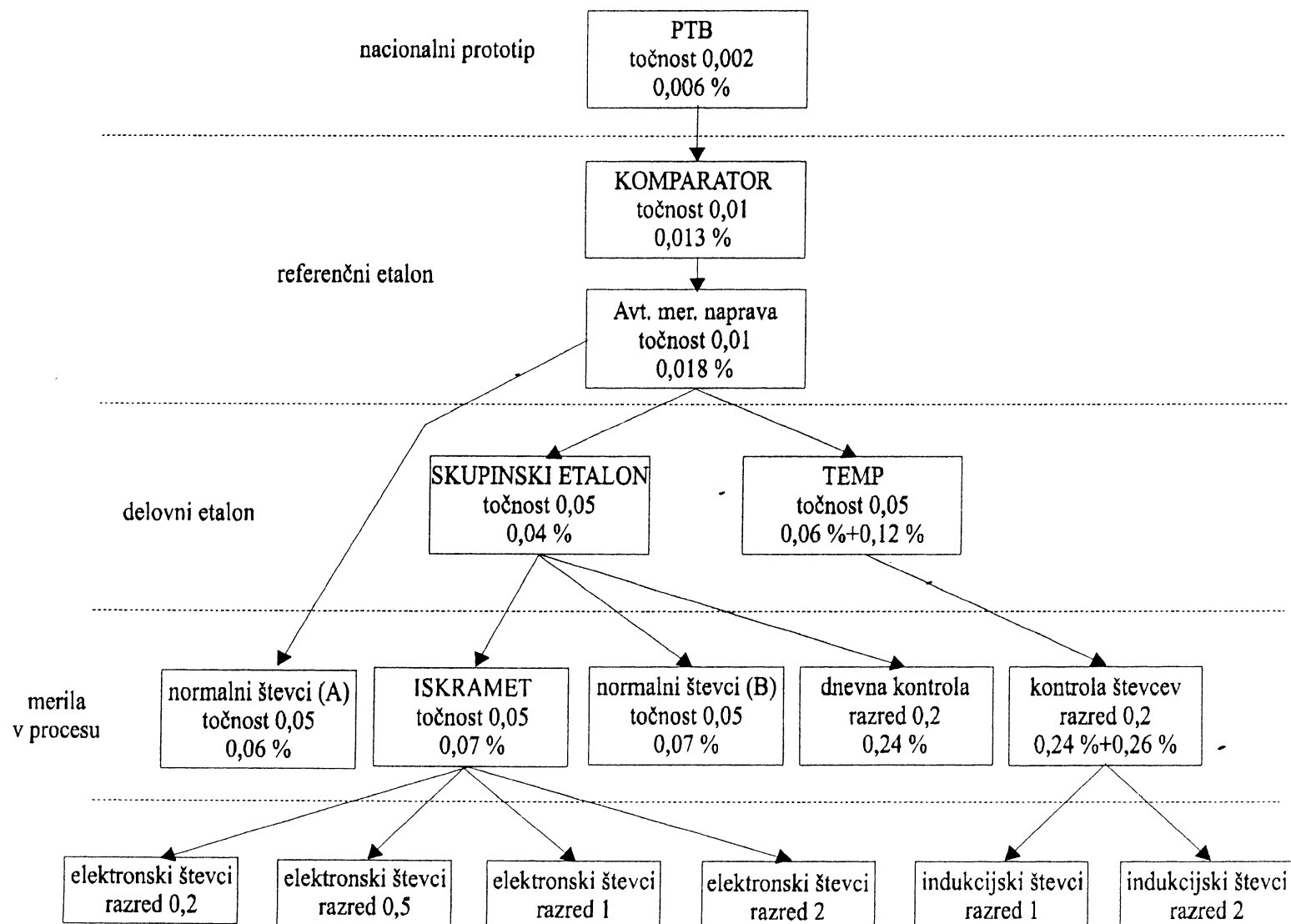
Ta ima določeno enoto na vrhu (**primarni etalon**);

- pod njim **sekundarne etalone**;
 - pod njim pa **delovne etalone**.

Enota, ki jo vzdržuje etalon nižjega reda, izhaja **iz enote**, ki jo vzdržuje **etalon višjega reda**.

Vsako merilo je **posredno umerjeno** s primarnim etalom!





Slika 3.4 Metrološka piramida sledljivosti (Iskraemeco)





Vsak korak v hierarhičnem postopku mora biti dokumentiran.

- **razviden ‘rodovnik’** merilnega rezultata - negotovost,
- govorimo o **sledljivosti**.

Veda, ki znanstve proučuje področje združljivosti merilnih rezultatov na mednarodnem področju se imenuje **Zakonska metrologija**.

Pri nas je najvišji organ, ki je odgovoren za to področje:

Urad za standardizacijo in meroslovje

