METROLÓGOVE HODINY

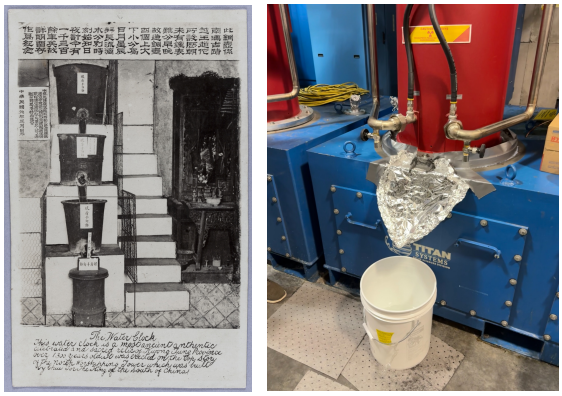
doc. Ing. D.V., PhD. VKS IIa,
metrológ v zácviku, zodpovedný za neistotu typu C
Dúbravský Metrologický Inštitút

Rukopis prijatý: 6.12.2025, článok prijatý: 9.12.2025, článok publikovaný: 19.12.2025

Čas ako fyzikálna aj filozofická veličina predstavuje kontinuum, v ktorom sa odohrávajú všetky procesy. Meranie času prešlo dlhým vývojom – od počítania východov slnka až po atómové hodiny. Článok sa venuje návrhu a metrologickej charakterizácii meradla času – hodín, v kontexte personálu a laboratória jednosmernej elektrickej metrológie.

1. ÚVOD

Hodinár je kvalifikovaný odborník, ktorý rozumie mechanike jemných strojčekov a dokáže diagnostikovať a opraviť rôzne problémy s hodinovým mechanizmom. Elektrický metrológ naproti tomu vôbec nerozumie mechanike jemných strojčekov a nedokáže konštruovať, diagnostikovať, ani opraviť hodinový mechanizmus. Metrológ ale potrebuje vedieť kedy ísť na obed, alebo kedy opustiť miesto výkonu pracovnej činnosti a to s extrémne nízkou neistotou.



a) *b)*

Obr. 1: Vodné hodiny: a) implementácia Clepsadra [1], Čína, 1324 n.l., b) implementácia Spallation Neutron Source, USA, 2024 n.l.

V tých najlepších metrologických inštitútoch nájdeme sofistikované prístroje na meranie času [2]. Na oddelení času v národnom inštitúte v oblasti Karlovej vsi je to napríklad kýbel v strede miestnosti, do ktorého kvapká voda.

Nie všetky metrologické inštitúty si však môžu dovoliť takéto pokročilé vybavenie. V každom sa ale nájdu žriedla mluna, alebo rôzne mnohomery. Stará múdrosť vraví: ak jediný nástroj, ktorý máme je kladivo, každý problém vyzerá ako klinec. To nás privádza k myšlienke využiť mlunové napätie na zobrazenie času. Táto myšlienka nie je vôbec nová. Na interweboch nájdeme 2 660 000 literárnych prameňov na tému voltmetrové hodiny. Typická realizácia je znázornená napríklad na Obr. 2.



Obr. 2: Príklad realizácie medzi amatérmi veľmi obľúbených voltmetrových hodín [4]

Takéto hodiny síce vyzerajú na pohľad atraktívne, ale ich úžitková hodnota je minimálna. Ručičkové ukazovatele majú neznámu triedu presnosti, nepoznáme linearitu, z merania sa nedá vytvoriť

protokol. Podobné praktiky sú v každom renomovanom metrologickom laboratóriu nepredstaviteľné.

Dúbravský Metrologický Inštitút udáva trendy, preto sme pristúpili k vývoju Metrológových hodín, ktoré netrpia žiadnymi zo spomínaných problémov.

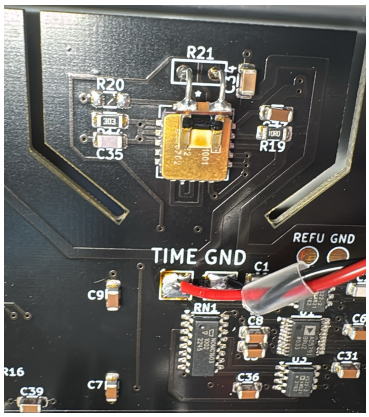
2. HODINY

Metrológove hodiny vyvinuté v DMI pristupujú k problému inak. Čas je reprezentovaný jednosmerným napätím $U_{VÝSTUPNÉ}$ v rozsahu 0,0000 V až 23,5959 V podľa vzťahu:

$$U_{VÝSTUPNÉ} = H \times 1{,}0000\,\frac{V}{hod} + M \times 0{,}1000\,\frac{V}{min} + S \times 0{,}0010\,\frac{V}{sek}, \qquad (1)$$

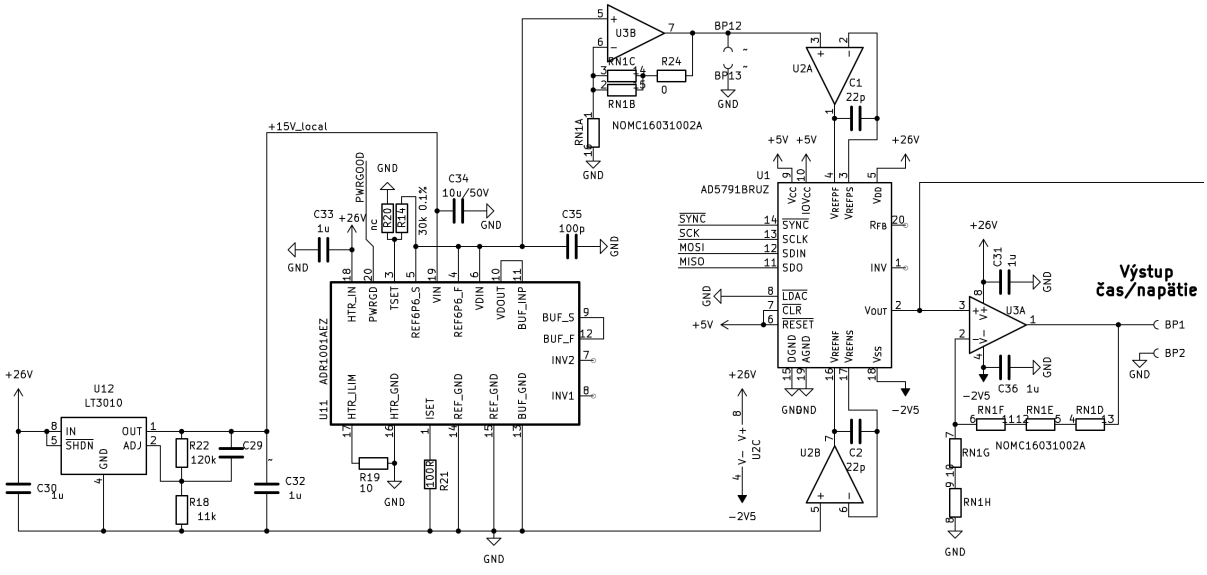
kde H je aktuálna hodina, M je aktuálna minúta a S je aktuálna sekunda. $U_{VÝSTUPNÉ}$ sa meria podľa možnosti referenčným mhonomerom Fluke 8588A, alebo alternatívne HP/Agilent/Keysight 3458A (podľa toho ktorý týždeň bol mnohomer zakúpený).

Rovnicu (1) realizuje 20-bitový číslicovo-analógový prevodník AD5791BRUZ s vynikajúcou linearitou. Ako referenčný zdroj polnoci (23:59:59) je použitý integrovaný obvod ADR1001. Referenčné napätie pochovanej Zenerovej diódy cca. 6,6 V je zosilnené na nominálnych 10 V pomocou precízneho samonulujúceho sa operačného zosilňovača ADA4522-2. Pomer hodnoty napätia referencie 6,6 V a nominálnych 10 V je takmer presne 1,50, čo umožňuje v spätnej väzbe operačného zosilňovača použiť pomerovú odporovú sieť. Realizácia je na Obr. 3 a podrobnejšia schéma zapojenia analógovej časti na Obr. 4.



Obr. 3: Zdroj referenčnej polnoci 23:59:59 (hore) a číslicovo analógový prevodník s nízko-flákajúcimi sa zosilňovačmi (dole)

Čas v mikrokontroléri je riadený externým prerušením s frekvenciou 10 Hz, odvodenou od aktívneho vodíkového masera. V prípade, že je potrebné hodiny prenášať a predlžovačka od masera by bola nepraktická, je v zariadení osadený



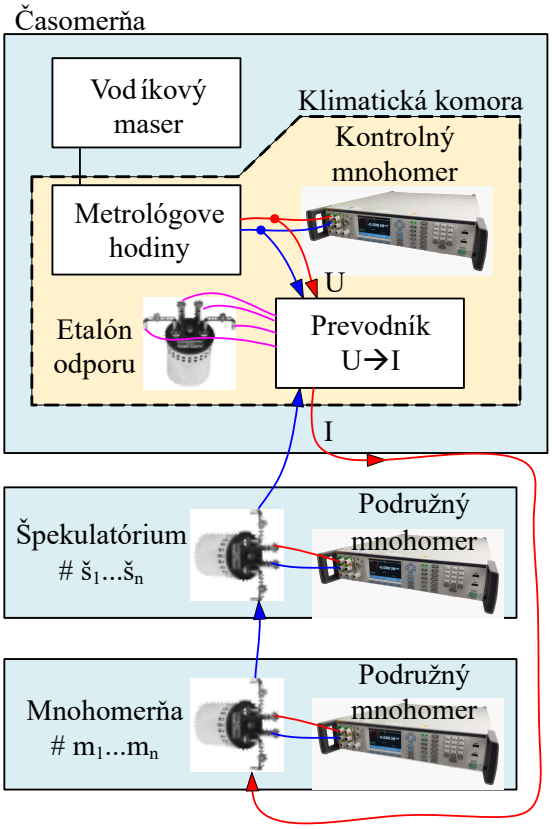
Obr. 4: Analógová časť Metrológových hodín

termostatovaný vysoko stabilný oscilátor s teplotnou stabilitou frekvencie ±10 nhod/hod v rozsahu -20 až +80 °C a 1-ročným starnutím max. ±50 nrok/rok. Termostatovaný oscilátor má ale vysoký stratový výkon, takže nezanedbateľne ohrieva vnútro hodín, čím ovplyvňuje ich presnosť.

3. DISTRIBÚCIA ČASU DO PRIĽAHLÝCH ŠPEKULATÓRIÍ A MNOHOMERNÍ

Vo väčších firmách, alebo laboratóriách sa veľmi často používajú centrálne a podružné hodiny. Čas sa do podriadených hodín prenáša kladkami, alebo elektricky vodičmi.

V DMI vyvinuté hodiny nie sú žiadna výnimka. Vzhľadom na to, že rozvod presného napätia nie je jednoduchý a podlieha chybám a rušeniu, museli sme vyvinúť robustnú metódu ako rozšíriť čas do susedných miestností. Prenos prúdu netrpí týmito problémami.



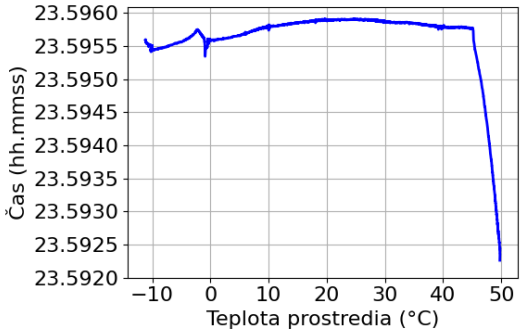
Obr. 5: Dodávka času do priľahlých špekulatórií a mnohomerní

Metrológove hodiny preto priamo v zariadení obsahujú precízny prevodník čas na prúd. Do ostatných laboratórií sa zavedie prúdová slučka a hocikto s potrebou presného času si do slučky jednoducho pripojí etalónový rezistor, na ktorom bude merať úbytok napätia svojim mnohomerom, ako vidíme na Obr. 5.

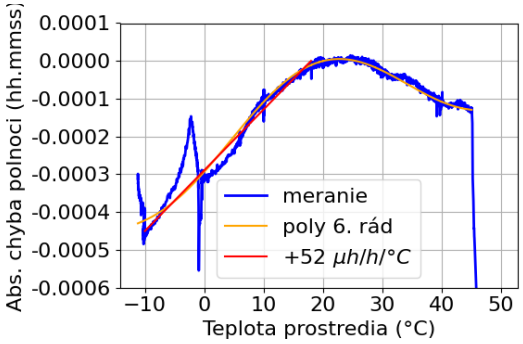
4. METROLOGICKÁ CHARAKTERIZÁCIA

A. Teplotná stabilita

Keďže zdroj času prichádza z externého vodíkového masera, teplota nemá vplyv na drvalý drift. Termostatovaný oscilátor pre prevádzku bez masera má v celom pravonom rozsahu teplôt (-20 až +80 °C) uvedenú stabilitou frekvencie ±10 nhod/hod, takže aj tento vplyv môžeme zanedbať. K teplotnej stabilite Metrológovych hodín dominantne prispieva analógová časť – zdroj referenčnej polnoci, samonulujúci sa zosilňovač a rezistorové siete. Stabilitu sme testovali v klimatickej komore v rozsahu teplôt –10 až +50 °C.



Obr. 6: Teplotná stabilita zdroja referenčnej polnoci



Obr. 7: Chyba polnoci ako funkcia teploty

Na Obr. 6 je zmeraná teplotná stabilita zdroja referenčnej polnoci, na Obr. 7 maximálna chyba času. Hodiny optimálne fungujú v rozsahu teplôt 20-30 °C. Od –10 do 15 °C má meraný čas chybu približne +50 μh/h/°C.

Teplotná regulácia pochovanej Zenerovej diódy prestáva pri 45 °C fungovať a chyba času začne prudko narastať. Je to vlastnosť, ktorá sa dá využiť v južnejšie položených laboratóriách, kde pri vysokých teplotách prostredia na presnom čase veľmi nezáleží.



Obr. 8: Metrológove hodiny v klimatickej komore. Video https://youtu.be/3YUfwMxNAhw

B. Presnosť a správnosť

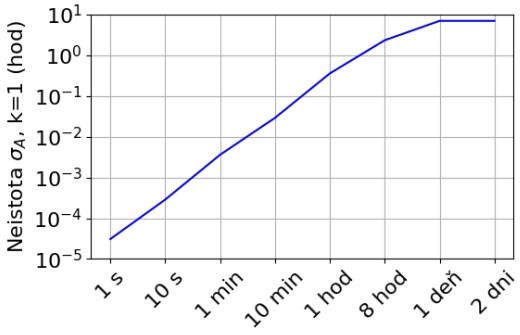
Následne sme merali presnosť a správnosť výstupného času. Pomocou referenčného mnohomera s exspirovanou kalibráciou sme zozbierali 345565 vzoriek, integračná doba bola 25 NPLC (500 ms).

Stredná hodnota:
$\overline{U_{VÝSTUPNÉ}} = 11{,}798706\ hod, minsek$,
neistota typu A:
$\sigma_A = 6{,}924206\ hod, minsek$ (k=1),
neistota typu B:
$\sigma_B = 0{,}000126\ hod, minsek$ (k=1)
Neistota typu C:
$\sigma_C = 0{,}010200\ hod, minsek$ (k=1)

Z nameraných dát je zjavné, že s 95% pravdepodobnosťou je presne:

11 hodín 79 minút a 87 sekúnd ± 13 hodín 84 minút a 84 sekúnd

Pri výpočte neistoty neistoty typu A sme si všimli zaujímavý fenomén, ktorý nie je úplne obvyklý v metrologickej praxi a vyžaduje podrobnejší výskum. Obvykle pri výpočte neistoty z vyššieho počtu meraní sa výsledná neistota typu A znižuje. V prípade metrológových hodín ale exponenciálne rastie, ako je vidieť na Obr. 9.



Obr. 9: Neistota typu A ako funkcia dĺžky merania

5. ZÁVER

V článku sme prezentovali návrh a realizáciu metrológových hodín. Dlhodobou metrologickou charakterizáciou sme zistili, že s 95% pravdepodobnosťou je presne 11 hodín 79 minút a 87 sekúnd ± 13 hodín 84 minút a 84 sekúnd. S malou úpravou software, sa z hodín stane praktický kalibrátor napätia, prúdu a odporu [5].

Pre dosiahnutie čo najlepšej stability sa doporučuje hodiny, spolu s indikačným mnohomerom prevádzkovať v klimatickej komore pri +23±0,1°C a 50% RH.

LITERATÚRA

[1] Clepsydra (water clock), Canton https://hpcbristol.net/visual/JC-s020

[2] Práznovský M.: Nové využitie vody v mierospytectve. *Annales Patroniensis* vol. II Nr. 1, 2024

[4] Daisy chain voltmeter clock https://www.printables.com/model/69859-daisy-chain-voltmeter-clock

[5] Valúch D.: Spoločensky zodpovedná metrológia – centrum komunitnej kali-

brácie elektrických veličín. *Annales Patroniensis* vol. III Nr. 1, 2025