

# Kapesní vyhledávač zkratu

Vyhledávač zkratu je miliohmometr s vysokým rozlišením  $0,1\text{m}\Omega$  v rozsahu od  $0\ \Omega$  až  $3,5\Omega$  a dále pak  $10\text{m}\Omega$  až do  $10\Omega$ . Takto vysoké rozlišení je schopné rozlišit i odpor  $1\text{mm}$  cesty na plošném spoji a tím lokalizovat zkrat s vysokou přesností.

Přesto, že to není primárním účelem, je možné jej použít i k měření malých odporů, přechodových odporů kontaktů a podobně.

Přístroj je ve formě pera, které se drží při měření v ruce pro snadnou manipulaci.

Miliohmometr je napájen 2ks AAA článků, má OLED display a akustickou signalizaci.

Motivace této konstrukce bylo pozorování zoufalého kamaráda jak hledá zkrat na prototypové desce plošného spoje. Škodolibě, jak jinak, protože tento problém dříve nebo později pozná každý. Příčiny zkratu bývají různé, od chybně vyrobeného PCB, vlasový spoj z pájky (viditelný samozřejmě až mikroskopem), vadná součástka (například vrstvené SMD kondenzátory dovedou překvapit i po delší době provozu) a mnoho dalších příčin. A hledání je někdy obtížné zahrnující i tak drastické metody jako přerušení plošného spoje za účelem zúžení místa kde hledat. A vzpomněl jsem si na řešení, které jsem zahlédl [1].

To bylo impulsem pro tuto vylepšenou variantu, vhodnou pro okamžité použití.

## Princip

Základní princip je tradiční “téměř” čtyřbodová Kelvinova metoda měření odporu průchodem proudu a přesným měřením napětí, který procesor následně vypočte s rozlišením na  $0,1\text{m}\Omega$ , nebo  $10\text{m}\Omega$  (podle použitého rozsahu).

Použití jako vyhledávač zkratu si ale vynutilo některé omezení a kompromisy.

Především šlo o použití pouze dvou ostrých hrotů, které samotné nejsou kompenzovány na vliv protékajícího měřicího proudu. Body průchodu proudu a měření se tedy setkávají již na hrotu a ne až na odporu jak by to správně mělo být. Proto označení “téměř” čtyřbodová metoda. Výhodou pouze dvou hrotů jsou ale právě jen 2 hroty, kde se snadno postupuje při připojování na mnoho míst a je tak snadné hrát se zkratem dětskou hru “přihořívá, přihořívá, hoří!”, ale je to zároveň hlavní důvod proč je dosažitelné rozlišení řádově lepší, než přesnost.

Jako zdroj měřicího proudu se používá zdroj konstantního napětí  $1,85\text{V}$  protékající vestavěnými odpory, které definují maximální měřicí proud a zároveň maximální měřicí napětí na hrotech. Proud je tak omezen na maximálně  $59,7\text{mA}$ , což je dostatečný proud na měření takto malého odporu a zároveň nehrozí poškození plošného spoje, nebo součástek. Odpor  $2\Omega$ , který je paralelně k měřenému odporu, zároveň omezuje maximální možné měřicí napětí na hrotech na  $112\text{mV}$ . To je dostatečně malé, aby nedošlo například k otevření přechodu diody. Takže nedochází k “úniku” měřicího proudu do ochranných obvodů vstupů a výstupů integrovaných obvodů a podobně. Zároveň je to dostatečně malé napětí, aby měřicí proud nemohl protéct přes choulostivé součástky, pro která by mohl být moc velký (například LED).

To je druhý hlavní kompromis. Teoreticky lepší alternativou by bylo použití proudového zdroje s omezením napětí. Jenže takové obvody jsou buď složité, nebo nedostatečně kvalitní. Zejména ohledně přechodu z maximálního napětí na maximální proud, stability proudu a velikosti šumu ovlivňujícího měření. Zdroj konstantního napětí s nekonstantním,

ale definovaně nekonstantním měřicím proudem má výhodu v jednoduché konstrukci a zároveň je snadné takto vzniknou nelinearitu závislosti napětí na odporu jednoduše dopočítat v procesoru matematicky.

Odpor paralelně k měřicímu vstupu má zároveň jednu výhodu a jednu nevýhodu. Výhodou je uspokojivá odolnost, kdy  $2\Omega$  odpor na vstupu dokáže spolehlivě odvést například zbytkové napětí nízkonapěťového kondenzátoru. Nevýhodou je, že i s rozpojenými hroty přes něj protéká 56,1mA a tím omezená životnost baterií asi 8-10 hodin, kdy je přístroj zapnutý.

Napětí vzniklé na měřeném odporu je snímáno rozdílovým operačním zesilovačem se zesílením 27. Jde o nejkritičtější součástku zapojení a je nutné použít přesný, nízkošumový, "zero drift" a rail-to-rail zesilovač.

Takto získaný signál je přiveden přes jednoduchý RC filtr na vstup A/D převodníku, kde se změří a procesor vypočte měřený odpor, o který od začátku jde.

Výsledná hodnota je zobrazena na OLED displeji a v případě potřeby je možné zapnout i akustickou signalizaci a hledat zkrat jen podle sluchu.

Přístroj je napájen ze 2 kusů AAA článků přes interní zvyšující měnič s vysokou účinností, který je konstruován s ohledem na nepatrný odběr ve vypnutém stavu a možnost aby se sám sebe dokázal vypnout.

## Obvodové řešení

Schéma zapojení je na obr. (číslo)

Na body P1A a P1B je připojený jeden měřicí hrot, na body P2A a P2B pak druhý dvou vodičově až na samotný hrot.

Z výstupu stabilizátoru U1 je odebíráno napětí 1,85V, ze kterého protéká proud do měřicího obvodu přes rezistory R6 až R9. Pokud je přístroj zapojen do měřeného obvodu, pak se část proudu, který naprázdno protéká přes R7+R8 uzavírá přes tento měřený obvod a napětí vzniklé na R7+R8 spolu s měřeným obvodem vstupuje přes připojovací body P1B a P2B do rozdílového zesilovače.

Odpory R7+R8 mají zvětšenou velikost na 2512 což jim dává větší možnost přežití výkonovou ztrátu, která na nich vznikne při nechtěném připojení na zbytkový náboj v kondenzátoru nebo podobně.

Rozdílový zesilovač je tvořen obvodem U3 a jeho zesílení je nastaveno rezistory R1 až R4 na 27. Odpor R17 má jediný účel a to oddělit signálovou zem od potenciálně zarušené napájecí a zároveň přirozeně na desce plošného spoje zajistit toto spojení ve vybraném vhodném místě.

Výstup rozdílového zesilovače vstupuje do RC obvodu s charakteristickou frekvencí 159Hz ( $R_{20}+C_{16}$ ) který má za úkol vyhradit přechodové děje vysoko nad vzorkovací frekvencí externího A/D převodníku a druhého RC obvodu s charakteristickou frekvencí 1592Hz ( $R_{19}+C_{15}$ ) na A/D převodník procesoru.

Externí A/D převodník U4 pracuje na 16 bitech s typickou vzorkovací frekvencí 15 vzorků za sekundu a tím analogová část končí.

Převodník je pomocí I2C sběrnice připojen spolu s OLED displejem na procesor U5, který tuto sběrnici řídí, vyčítá údaje z A/D převodníku a odesílá zobrazovaná data na OLED

display (U6).

Procesor U5 má také připojený obvod pro buzení elektrodynamického reproduktoru/pípátka složený z Q1, D3, R5 a R13, který ovládá přímo pomocí vnitřního časovače a jeho PWM výstupu.

Z procesoru je také vyvedeno programovací rozhraní SWD (bez konektoru, jen plošky na PCB).

Přes odpory R18 a R25 jsou na procesor také převedeny signály ovládacích tlačítek

Napájení celého zařízení je řešeno pomocí U2, kde použitý obvod TPS61021A je schopen startovat již při 0,9V. Tedy z napájení 2x AAA (LR 3) fungovat až do 0,45V na článek a vybrat tak baterie opravdu "do sucha".

Obvod U2 funguje jako zvyšující měnič, nastavený pomocí R22+R23 na 3,3V výstupního napětí.

Zapnutí zařízení funguje tak, že se napětí z baterie přivede stisknutím tlačítka SW1 přes D2 na vstup EN obvodu U2. Tím se nastartuje procesor U5, který pak drží zdroj a tím i sám sebe zapnutý signálem PA5 přes D2. Toto řešení umožňuje napájet ve vypnutém stavu pouze U2, který vypnutém stavu spotřebovává pouze 3 $\mu$ A (max podle datasheetu, reálně jsem naměřil asi 0,4 $\mu$ A včetně měření napětí, viz dále). Zařízení pak nejenže nepotřebuje žádný vypínač, protože má odběr ve vypnutém stavu menší než je samovybíjení článku, ale především dokáže při nečinnosti vypnout samo sebe.

Dále zařízení obsahuje obvod pro měření napětí baterií R26+C18 připojený na A/D převodník procesoru. Tady se ukázalo, že datasheet procesoru neobsahuje popis jak se chová procesor při vypnutém napájení a přivedeném napětí na A/D vstup. Proto jsem vybral z možných vstupů ten tolerantní na injektovaný proud a u prototypu navíc měl možnost odpojení elektronickým spínačem. Ukázalo se, že zbytečně, proud tekoucí ve vypnutém stavu přes R26 nedokáží ani změřit jak je malý, takže finální provedení tento spínač neobsahuje.

Stejně jako hlavní napájecí zdroj, procesor zapíná i stabilizátor U1 pro napájení měření.

Původní nápad napájení z jediného článku Li-ion velikosti 14500 se ukázal jako nerealizovatelný, protože plně nabitý překračuje maximum pro použitý procesor a potřebné napájecí obvody by tak byly ještě složitější.

## Kalibrace

Přístroj je nutné před prvním použitím kalibrovat, aby se kompenzovaly nepřesnosti použitých součástek. Tříbodová kalibrace se provádí ve čtyřech bodech pro 0 $\Omega$ , 1 $\Omega$ , 2 $\Omega$  a 8,2 $\Omega$ . Důvodem, proč je nutné použít 4 hodnoty pro tříbodovou kalibraci jsou dva rozsahy měření, které se interně kalibrují nezávisle a mají pouze 2 společné body.

Pro kalibraci je nejvhodnější kalibrační přípravek složený ze dvou stejných odporů 1 $\Omega$  sériově s minimální délkou propojení a odporu 8,2 $\Omega$ . Kalibrační odpory je nutno použít přesné, alespoň 1%, nebo lépe 0,1%.

Pro použití čistě na hledání zkratu není tato kalibrace kritická. Pro použití na orientační měření malých odporů dostanete jen tak kvalitní výsledky, jaká bude kvalita a pečlivost kalibrace. V tom případě je vhodné kalibraci pravidelně opakovat. Postup je popsán v kapitole Použití programového vybavení.

# Programové vybavení

Program je jednoduchá smyčka bez RTOS, která reaguje na události jako ukončení měření, nebo stisk tlačítka a zobrazuje na jedné několika z předprogramovaných obrazovek údaj podle aktuálního stavu a ovládá frekvenci PWM výstupu pro generátor pípátka. Celý software je zveřejněn jako zdrojový kód i jako binární soubor pro vydané verze.

Jako překvapení se ukázal problém “nacpat” takto jednoduchý SW do 32kB dostupné flash paměti i když jsou použité fonty redukovány na číslice a několik symbolů. Ze stejného důvodu jsou veškeré nápisy jako “Cal”, nebo “Batt” předprogramovány jako bitmapy. Program musí být zkompileován s vysokou optimalizací včetně LTO aby se do procesoru vešel.

Program vyčítá po dokončení měření hodnotu z externího A/D převodníku a za pomoci float-point výpočtu, modelu analogové části a kalibračních hodnot z něj vypočítává měřený odpor, který zobrazuje. Kalibrace je využita k tříbodové kvadratické kompenzaci nepřesnosti. Kalibrační hodnoty spolu se stavem otočení displeje a stavem zapnutí “pípátka” jsou uloženy do flash, kde vzhledem k principu nutnosti neztratit hodnoty při mazání stránky flash je minimální velikost obsazené paměti dvě stránky paměti i když je ukládaný objem dat výrazně menší. Této technice se někdy nepřesně říká simulace EEPROM (kterou procesor neobsahuje). Pro software tak zbývá jen 28kB.

Interní převodník běží autonomně a za pomoci DMA kanálu ukládá změřená data do RAM, kde si je program přečte a použije.

Kromě vstupu z měřicího zesilovače interní A/D převodník zároveň měří vstupy tlačítek, napětí napájecí baterie, teplotu (aktuálně nevyužitá hodnota) a hodnotu z referenčního zdroje (pro kalibraci převodníku). Interní převodník pracuje s rozlišením 12bit a s 16x oversamplingem a 8MHz hodinami dokončí měřicí cyklus asi za 2ms. Výstup interního převodníku je dále softwarově zpracován klouzavým průměrem přes 64 hodnot kvůli omezení šumu.

Pro převod float-point na zobrazovanou hodnotu je použit mezikrok převodu na celé číslo které se jednoduchou funkcí převádí na text. Opět z důvodu zmenšení velikosti ve flash, kdy na standardní knihovny funkce prostě není místo.

## Použití programového vybavení

Stiskem a podržením tlačítka SW1 se přístroj zapne. Abychom zabránili náhodnému zapnutí, je nutné tlačítko stisknout na dobu

2s, během kterých je na OLED displeji zobrazeno napětí baterie a “A” číslo osazeného externího A/D převodníku pro kontrolu.

Pokud přístroj nebyl kalibrován, je po zapnutí v kalibračním režimu. Do kalibračního režimu se lze dostat i tak, že při zapínání podržíte stisknuté i tlačítko SW2.

Kalibrace je signalizována postupným zobrazením “Cal 0Ω”, “Cal 1Ω”, “Cal 2Ω” a “Cal 8.2Ω”. Provádí se tak, že na výzvu “Cal 0Ω”, zkratujete hroty a zmáčknete tlačítko SW2. Pak postupně totéž s připojením na 1Ω, 2Ω a 8,2Ω.

Kalibrovaný přístroj pak jednoduše ukazuje hodnotu připojeného odporu. Nebo symbol “>10Ω”.

Funkci akustické signalizace lze zapnout a vypnout pomocí stisku SW2.

Pomocí podržení SW2 lze zobrazený obsah na OLED displeji otočit, podle toho zda přístroj

držíte v levé nebo pravé ruce.

Podržení SW1 se přístroj vypne, stejně jako se vypne sám po 5 minutách nečinnosti.

Tento popis je platný pro verzi SW 1.02.00, na domovské stránce projektu se může objevit novější s rozšířenou funkcí.

## Konstrukce

Zvolená konstrukce “pero do ruky s ocáskem” vyžaduje kompaktní provedení. Dnes je již každému dostupný 3D tisk (někdo má doma, přes kamaráda, veřejně přístupné v knihovně nebo jednoduše objednat u firmy) takže volba na 3D tištěnou konstrukci byla jasná.

Konstrukce je tvořena dvěma polovinami pouzdra, které jsou na konci spojené převlečnou maticí. Pozor! Zadní maticí zároveň prochází měřicí kabel, který je nutné provléknout maticí ještě před zapájením kabelu do plošného spoje, nebo složením pouzdra hrotu.

Uvnitř pouzdra se nachází tištěný spoj se součástkami, na kterém je přes 3D tištěný distanční rámeček umístěn OLED displej. Doporučený způsob složení je napřed vložit OLED do rámečku a zafixovat kapkou lepidla (mezi plošný spoj displeje a rámeček). Pak za pomoci jiné kapky lepidla přilepit rámeček na plošný spoj přístroje a ještě než lepidlo zatvrdne vložit tuto sestavu do horní strany pouzdra a tím zajistit, že OLED přesně zapadne na své místo. Teprve pak po vytvrzení lepidla propojit displej na hlavní plošný spoj pomocí 4 vodičů.

Jako samostatný problém se ukázal plošný spoj, který obsahuje většinu součástek. Od prvního momentu bylo jasné, že kvůli kompaktnímu provedení musí být v provedení SMD při použití většiny součástek velikosti 0603 a součástky jako regulátor U2 nelze rozumně osadit jinak, než s pájecí pastou. První 3 prototypy jsem osazoval ručně s pastou nanesenou přes “stencil”, druhý prototyp zveřejněný v tomto článku jsem nechal většinu součástek (hlavně tu pasivní drobotinu) osadit automatem u firmy které jsem zároveň objednával plošný spoj. Upřímně jsem byl překvapen cenovou kalkulací, kdy při 10ks vyšel 1ks s osazenou horní stranou bez integrovaných obvodů jen součástky co jsou v automatu bez příplatku na cca 70 Kč. Bohužel je při tomto postupu ekonomika neúprosná a finančně zajímavé je to až při více kusech.

## Uvedení do chodu.

Uvedení do chodu je celkem bez záludností. Doporučuji následující postup:

Osazený plošný spoj ještě bez OLED displeje připojit na 3V regulovaný zdroj nebo rovnou na AAA články. Odběr by měl být max 3μA.

Stiskem tlačítka SW1 uvedeme do provozu vnitřní zdroj 3,3V a ověříme toto napětí na kontaktech pro OLED nebo SWD.

Podle kap. Konstrukce umístíme a připájíme OLED na místo.

Naprogramujeme procesor pomocí STM32 programátoru přes rozhraní SWD. Pokud programátor má výstup napájení 3,3V, můžete je použít a pomocí programátoru zařízení během programování napájet. Pokud programátor napájení nemá, je nejjednodušší před a během programování při vložených napájecích článcích držet tlačítko SW1, což zajistí sepnutí vnitřního napájení.

Programátor je možné připojit dočasně “nějak”, ale mě se osvědčil klips [6]

# Poznámky k součástkám

Návrh vznikl na jaře 2022 za situace s omezenou dostupností mnoha součástek. To si vynutilo několik překvapujících použití.

V roli napájecího obvodu U2 by se více hodil TPS61071, nebo MCP16401. Obě možnosti mají vhodnější pouzdro pro ruční amatérské osazování. Musel jsem ale brát z toho, co bylo k dispozici. TPS61021A v pouzdře WSON-8 (2\*2mm součástka i s nožičkami) už chce trochu zkušeností a alespoň horký vzduch, nebo ještě lépe pec.

A/D převodník MCP3421A3T má část za "A" určující adresu, na které se hlásí na sběrnici I2C. Nejběžnější je MCP3421A0T, jenže opět stejný příběh. Dostupná byla jen verze A3. SW od verze 1.01.00 má automatické vyhledání, takže jinou variantu software najde a signalizuje symbol například "A0" pro MCP3421A0T na startovací obrazovce.

AD8628 může být nahrazen jiným zesilovačem podobných parametrů. Viz kap. Princip.

## Možné modifikace a vylepšení

Místo jednoduchých nabodávacích hrotů je možné použít speciální svorky "krokodýlky", kde jsou čelisti navzájem izolované a každá z čelistí je spojena s jedním bodem měření. Získáte tím právě čtyřbodové Kelvinovo měření odporu s daleko lepší přesností. To však za cenu ztráty jednoduchosti použití dvou hrotů a za cenu ztráty odolnosti vstupu rozdílového zesilovače.

Další možná vylepšení jsou v software.

- Možnost využít měření s rychlou reakcí interním převodníkem bez využití klouzavého filtru k signalizaci rychlého dotyku prodloužením "pípnutí" usnadnit hledání "druhých konců" vodiče.
- Akustická signalizace rychlosti bzučení místo výšky tónu a další.
- volba typu napájecích článků, kdy se při volbě NiMh varianty aktivuje ochrana proti nadměrnému vybití

Tyto nápady nebyly v době psaní článku realizované, ale doporučuji se vrátit na stránku SW [3] později. Možná bude čas to vylepšit, nebo předvést největší výhodu open-source software a to že spoluprací více lidí je možné dosáhnout lepších výsledků.

## Testovací a demonstrační přípravek

Zároveň s návrhem hlavního přístroje jsem řešil na čem ověřit jeho funkci. Za tímto účelem jsem si vytvořil testovací přípravek [7], který se skládá ze šesti rezistorů SMD a dlouhé cesty bez pájecí masky vhodné k ověření funkce vyhledávače zkratu a zároveň se hodí na snadnou kalibraci, protože poskytuje potřebné hodnoty odporu 1Ω, 2Ω a 8,2Ω. Plošný spoj pro přehlednost obsahuje v popisu pouze hodnoty rezistorů, ale ne jejich označení.

## Závěr

Celé zapojení je optimalizované na maximální rozlišení měřeného odporu, které je až 0,1mΩ. Pro hledání zkratu metodou "přihořívá, přihořívá, hoří!" je nejdůležitější právě vysoké

rozlišení, nikoli absolutní přesnost. Nicméně i tak mě překvapila dosažitelná opakovatelnost měření odporu, takže je přístroj možné použít i pro orientační měření malých odporů obecně. Například odpor bočniců měření proudu, přechodových odporů konektorů nebo spínačů, odpor kabelu a podobně.

## Poděkování

Tímto děkuji autorům původního nápadu [1]. Dále pak Pavlu Haisovi za neocenitelnou pomoc při návrhu konstrukce. A také všem co se nestydí zveřejňovat své konstrukce k realizaci nebo jen inspiraci.

## Seznam součástek

C1,C4,C6,C8,C9,C11,C12,C14,C15,C16,C18	0.1u	0805
C2,C3,C5,C7,C10,C13,C19	10u	1206
C17	10p	0603
D2	BAS40-05-TP	SOT-23-3
D3	1N4148WS T4	SOD-323
L1	470nH	GPSR0420
L2	6.3nH	0603
LS1	CMT-7525-80-SMT-TR	
Q1	BC817-16	SOT-23-3
R1,R2,R13,R18,R19,R25	1k	0603
R3,R4	27k	0603
R5,R15,R16,R22	100k	0603
R6	30R	1206
R7,R8	1R	2512
R9	1R	1206
R10,R11,R12,R20,R26	10k	0603
R14,R21	1M	0603
R17	0R	0603
R23	316k	0603
SW1,SW2	EVPBFAC1A000	
U1	TPS7A20185PDBVR	SOT-23-5
U2	TPS61021ADSGR	WSON-8
U3	AD8628WAUJZ-RL	TSOT-5
U4	MCP3421A3T-E/CH	SOT-23-6 nebo jiný MCP3421AxT viz text
U5	STM32G030F6P6	TSSOP-20
U6	OLED 0.91 Inch	
2 ks AAA alkalické baterie (LR03), nebo Mi-Mh (GR03)		
kontakty pro baterie AAA [4]		
2 ostré měřicí hroty tlustý konec Ø3.5mm, [4]		
asi 1m kabelu; dvoužilový vnější cca Ø3.5mm		

# Odkazy

- [1] Konstrukce vychází z příspěvku od autora Krypton2035  
[https://www.eevblog.com/forum/testgear/finding-short-on-motherboards-with-a-shorty-\(with-display\)/](https://www.eevblog.com/forum/testgear/finding-short-on-motherboards-with-a-shorty-(with-display)/)
- [2] Editovatelné schéma a plošný spoj v on-line nástroji EasyEDA  
<https://oshwlab.com/jdobry/shortypen>
- [3] Software včetně zdrojového kódu a modely pro 3D tisk  
<https://gitlab.com/jdobry/shortypen/>
- [4] Podrobné informace k součástkám s odkazy  
<https://gitlab.com/jdobry/shortypen/-/blob/main/BOM.md>
- [5] Video testování prototypu a předvedení funkce <https://youtu.be/PTSSFycWCzc>
- [6] Programovací klips <https://www.thingiverse.com/thing:3093212>
- [7] Testovací a demonstrační přípravek <https://oshwlab.com/jdobry/r-test>