

Zesilovač šumu

Ing. Jiří Doležílek

Popisovaný zesilovač byl navržen a zkonstruován jako přípravek pro osciloskopické zobrazování slabých nf signálů - především nf šumu napěťových referencí.

Pokud chceme osciloskopem sledovat velmi slabé nf signály o rozkmitu řádu desítek μV , narazíme na několik problémů: při nastavené nejvyšší citlivosti osciloskopu se uplatňuje jeho vlastní šum, který překrývá měřený signál, a vlivem zemních smyček se na kabelu od měřicí sondy osciloskopu vytváří brumové napětí o kmitočtu sítě (50 Hz), které znemožňuje nebo alespoň velmi ztěžuje měření. Mnohdy také osciloskop nemá ani dostatečnou citlivost.

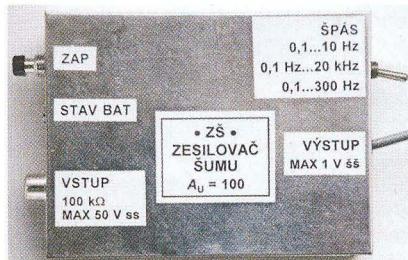
S uvedenými problémy jsem se setkal, když jsem potřeboval na osciloskopu zobrazit šum stabilizátoru laďacího napětí pro varikapy ve vyvíjeném vf generátoru. Abych mohl tento šum zobrazit, musel jsem zkonstruovat nízkošumový nf předzesilovač k osciloskopu, který jsem nazval zesilovač šumu (ZŠ).

Zesilovač šumu má napěťové zesílení 100 a tři volitelné šířky přenášeného pásma kmitočtů: 0,1 až 10 Hz, 0,1 až 300 Hz a 0,1 až 20 kHz. Při zkratovaném vstupu a šířce pásma 0,1 až 300 Hz má vlastní šum na vstupu zesilovače rozkmit asi 2 μV a na obrazovce osciloskopu s citlivostí 2 mV/cm se zobrazuje jako „chlupatá čára“ o rozkmitu asi 2 mm.

Zesilovač šumu má natolik velké zesílení a natolik malý vlastní šum, že zesílený šum jakékoli napěťové reference nebo stabilizátoru napětí je na osciloskopu zřetelně patrný a pro různé zdroje šumu je možné rozkmit šumu a jeho charakter spolehlivě měřit a porovnat.

Přínos zesilovače šumu spočívá i v jeho mechanickém provedení. Je zkonstruován jako sonda s vlastním bateriovým napájením, která se připojuje k osciloskopu delším kablíkem. Výstup zdroje napětí, jehož šum měříme, je tak možné bezprostředně připojit ke vstupu zesilovače šumu a minimalizovat tak brumové napětí, které se dostává na vstup osciloskopu vlivem zemních smyček v soustavě přístrojů napájených ze sítě.

Zesilovač šumu je napájen napětím 3 V ze dvou AAA alkalických článků. Napájení z baterie je nejjednodušší a též přispívá k minimalizaci rušivých signálů na výstupu zesilovače. Aby baterie dlouho vydržela a zbytečně se nevybíjela, když bychom zapomněli přístroj vypnout, je zesilovač šumu opatřen automatickým vypínačem napájení. Zapíná se stisknutím tlačítka a asi po patnácti minutách se sám vypne. Stav baterie je indiko-



ván diodou LED. Pokud má napětí baterie dostatečnou velikost, svítí tato LED při stisknutém zapínacím tlačítku.

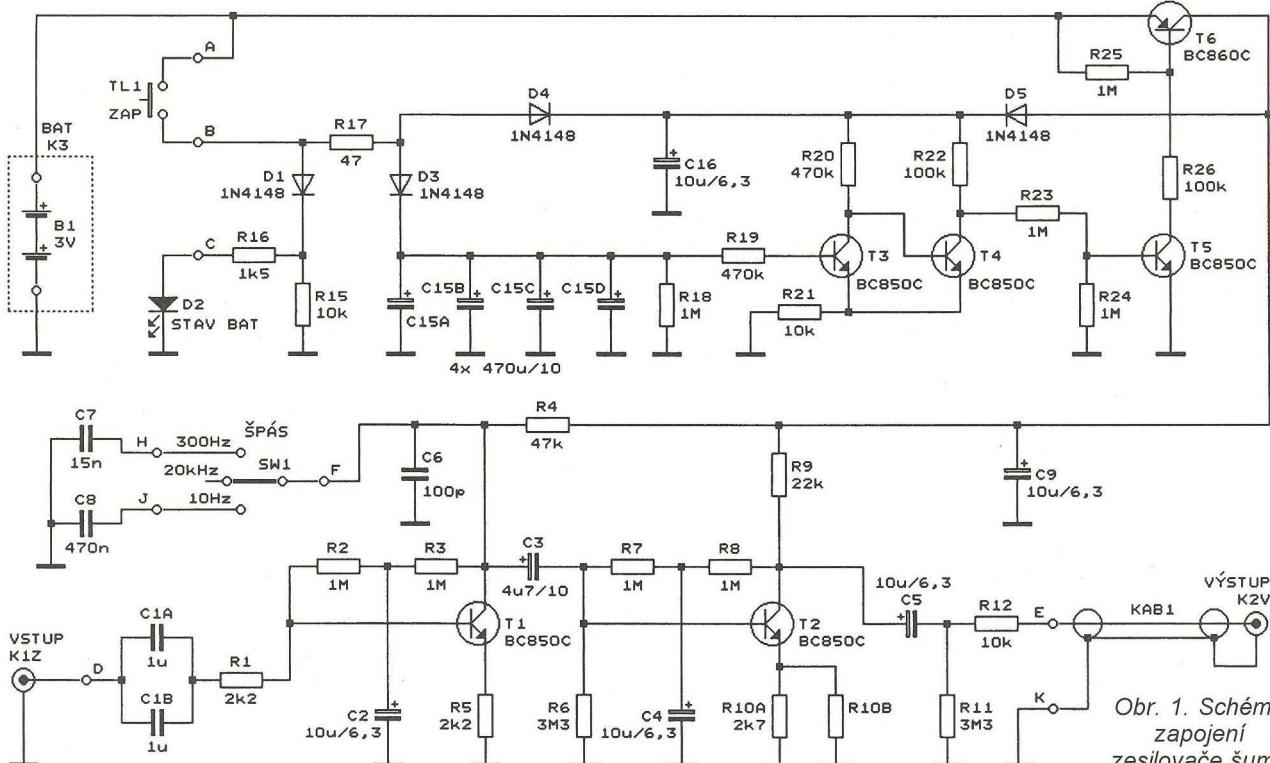
Popis funkce

Schéma zesilovače šumu je na obr. 1. Přístroj se skládá z nf zesilovače, který je v dolní polovině schématu, a z automatického vypínače napájení, který je v horní polovině schématu.

Nf zesilovač je dvoustupňový s nízkošumovými tranzistory BC850C.

Ze vstupního konektoru K1Z (zásvuka CINCH) je měřený nf signál veden přes oddělovací kondenzátor C1 a ochranný rezistor R1 do prvního zesilovacího stupně.

Tranzistor T1 v prvním stupni je zapojen se společným emitem. Jeho nf zesílení je přibližně určováno poměrem odporu pracovního rezistoru R4 a zpětnovazebního rezistoru R5.



Obr. 1. Schéma zapojení zesilovače šumu

Pracovní bod T1 je definován ss zápornou zpětnou vazbou zaváděnou z kolektoru na bázi T1 rezistory R2 a R3. Aby tato zpětná vazba neovlivňovala nf zesílení, je mezi R2 a R3 zapojen blokovací kondenzátor C2. Při napájecím napětí 3,12 V protéká kolektorem T1 proud asi 49 μ A. Vůči zemi je na emitoru T1 ss napětí asi 0,1 V, na bázi T1 je ss napětí asi 0,62 V a na kolektoru T1 je ss napětí asi 0,82 V.

Druhý zesilovací stupeň s T2 je zapojen též shodně s prvním stupněm. Pouze je nastaveno větší ss kolektorové napětí tranzistoru T2 vůči zemi, aby mohl mít nf signál na kolektoru T2 co největší rozkmit. Ss kolektorové napětí T2 je proto určováno zpětnovazebním děličem se součástkami R6 až R8 a C4. Při napájecím napětí 3,12 V protéká kolektorem T2 proud asi 74 μ A. Vůči zemi je na emitoru T2 ss napětí asi 0,17 V, na bázi T1 je ss napětí asi 0,70 V a na kolektoru T1 je ss napětí asi 1,5 V. Nf zesílení druhého stupně je přibližně určováno poměrem odporů pracovního rezistoru R9 a zpětnovazebního rezistoru R10A. K rezistoru R10A můžeme připojit paralelně další rezistor

R10B s odporem řádu desítek k Ω a tím mírně upravit zesílení druhého stupně tak, aby celkové zesílení zesilovače šumu bylo asi 100.

Zesílený nf signál je z kolektoru T2 veden přes oddělovací kondenzátor C5 a oddělovací rezistor R12 do koaxiálního výstupního kablíku KAB1 zakončeného konektorem K2V (vidlice BNC). Rezistor R11 umožňuje průtok nabíjecího proudu kondenzátoru C5 a zajistuje tak nulovou ss složku signálu na výstupním konektoru.

Nejvyšší horní mezní kmitočet zesilovače šumu je určován blokovacím kondenzátorem C6 připojeným ke kolektoru T1. C6 spolu s R4 tvoří RC dolní propust s mezním kmitočtem asi 20 kHz (-3 dB) a s kmitočtovou charakteristikou klesající směrem k vyšším kmitočtům se sklonem asi -6 dB/okt. Přepínačem SW1 označeným ŠPÁS (šířka pásmu) lze paralelně k C6 připojit další kondenzátory C7 nebo C8 a tím snížit horní mezní kmitočet zesilovače na asi 300 Hz nebo 10 Hz.

Dolní mezní kmitočet 0,1 Hz zesilovače šumu byl zvolen v souladu s katalogovými údaji firmy Analog Devices, které u svých napěťových referencí specifikují šum v pásmu 0,1 až 10 Hz.

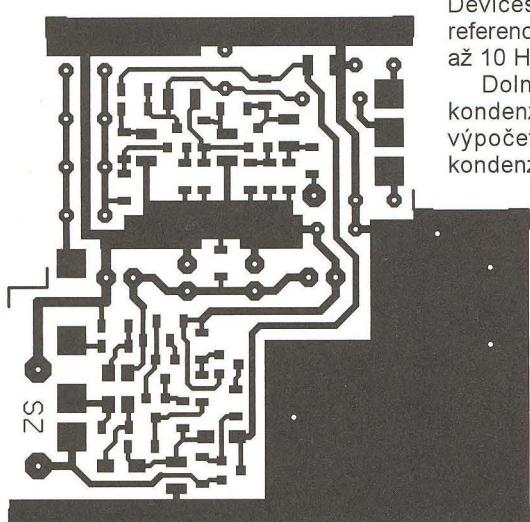
Dolní mezní kmitočet je určován kondenzátory C1 až C5. Protože by výpočet potřebných kapacit těchto kondenzátorů byl velmi obtížný, byly

kapacity uvedených kondenzátorů stanoveny zkusemo na základě měření kmitočtové charakteristiky zesilovače tónovým generátorem a osciloskopem. Aby mohlo být měření vůbec uskutečněno, byl zesilovač zapojen na nepájivém kontaktním poli a výběrem C1 až C5 byl jeho dolní mezní kmitočet (-3 dB) nastaven 100 Hz. Pak byly kapacity kondenzátorů C1 až C5 zvětšeny 1000x, čímž byl dolní mezní kmitočet snížen na 0,1 Hz. Tyto přeponíčtané kapacity jsou uvedeny na schématu na obr. 1 a v seznamu součástek.

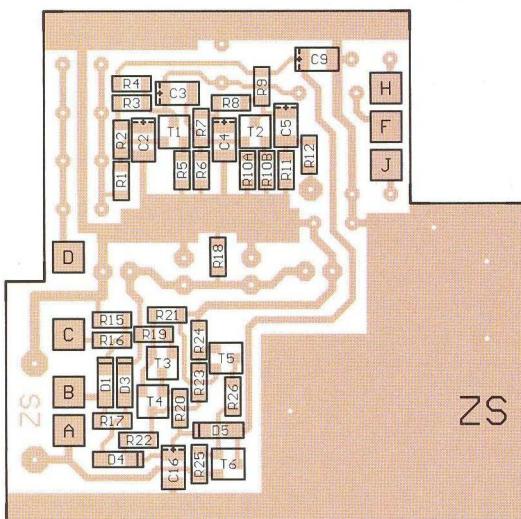
V praktickém provozu zesilovače šumu se ukazuje, že dolní mezní kmitočet 0,1 Hz není příliš vhodný, protože způsobuje dlouhodobé ustalování pracovních bodů T1 a T2 po zapnutí napájení nebo po připojení ss napětí na vstup zesilovače. Zotavení zesilovače trvá několik desítek sekund, což nepříjemně zdržuje měření. Přitom kmitočty pod 1 Hz stejně nelze na běžném osciloskopu sledovat, museli bychom mít paměťový osciloskop nebo analogový zapisovač. Proto je možné doporučit zvýšení dolního mezního kmitočtu zesilovače na 1 Hz tím, že se kapacity kondenzátorů C1 až C5 zmenší 10x oproti schématu (a seznamu součástek). S takto upraveným zesilovačem bude práce určitě přijemnější a rychlejší.

Zesilovač šumu je napájen napětím 3 V z baterie B1 tvořené dvěma alkalickými články AAA. Napájecí napětí se do zesilovače přivádí přes spínací tranzistor T6 automatického vypínače napájení.

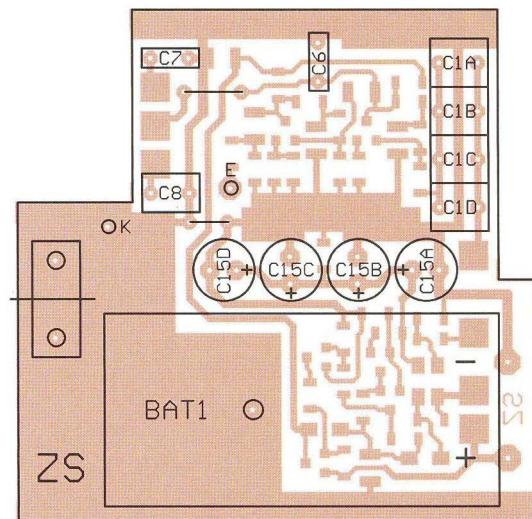
Automatický vypínač je navržen tak, aby fungoval už od minimálního napájecího napětí 2 V a současně měl zanedbatelnou spotřebu. Proto je sestaven z diskrétních tranzistorů pracujících s minimálními proudy. Je tvořen zapínacím tlačítkem (ZAP) TL1, paměťovým kondenzátorem C15, komparátorem se Schmittovým klopným obvodem (SKO) s tranzistory T3



Obr. 2. Deska s plošnými spoji ZS (měř.: 1 : 1)



Obr. 3. Rozmístění součástek SMD na straně spojů



Obr. 4. Rozmístění vývodových součástek na straně součástek

a T4, spínačem napájení s T5 a T6 a několika dalšími součástkami.

Napájení se zapíná krátkým stisknutím tlačítka TL1. Během stisknutí se přes oddělovací diodu D3 nabije paměťový kondenzátor C15. Rezistor R17 omezuje maximální velikost nabíjecího proudu. Z prostorových důvodů je C15 tvořen paralelním spojením 4 kondenzátorů C15A až C15D. C15A až C15D musejí mít co nejmenší svodový proud, osvědčily se s provozní teplotou do 105 °C.

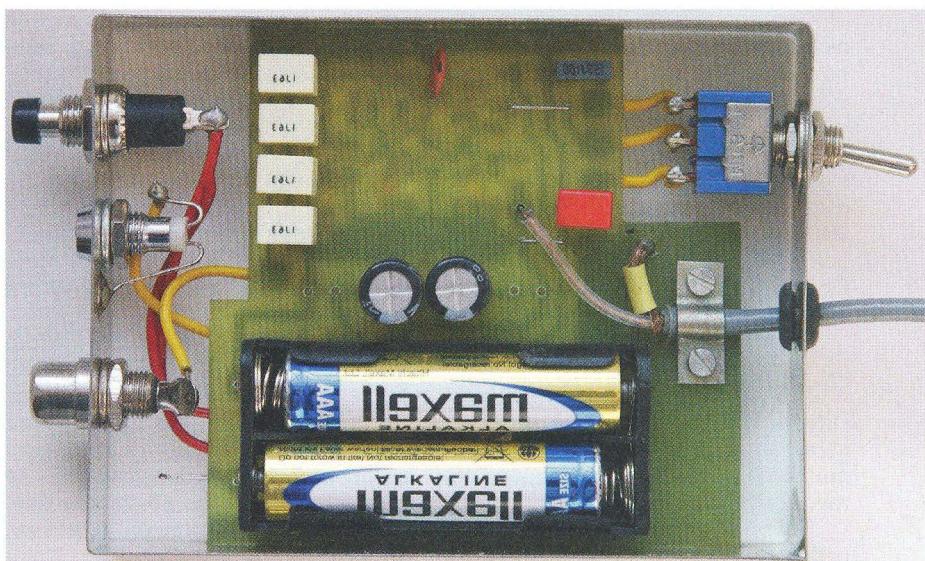
Při stisknutém TL1 se také přes další oddělovací diodu D4 přivadí napětí baterie na napájecí sběrnici SKO s T3 a T4. Když je C15 nabity, je na vstupu SKO napětí vyšší než horní rozhodovací úroveň SKO (která při napětí baterie 3,0 V je asi 0,7 V a mírně závisí na vlastnostech T3, T4 a na teplotě), takže na výstupu SKO (na kolektoru T4) je vysoká úroveň H. Díky tomu jsou oba tranzistory T5 a T6 spínače napájení sepnuté a napětí baterie se přivadí na napájecí sběrnici zesilovače.

Přes sepnutý T6 a oddělovací diodu D6 se napětí baterie přivadí i na napájecí sběrnici SKO, takže SKO zůstává napájený i po uvolnění tlačítka TL1, kdy se přeruší jeho napájení přes D4.

Paměťový kondenzátor C15 je pomalu vybíjen vstupním proudem SKO a především proudem tekoucím vybíjecím rezistorem R18. Když asi po deseti až patnácti minutách (přesně jsem to nezjišťoval) napětí na C15 poklesne pod dolní rozhodovací úroveň SKO (která při napětí baterie 3 V je asi 0,5 V a též závisí na vlastnostech T3, T4 a na teplotě), překlopí se výstup SKO do nízké úrovně L. Následkem toho vypnou oba tranzistory T5 a T6 a ukončí se napájení zesilovače.

Po vypnutí T6 se ukončí i napájení SKO přes D5, takže SKO se dostává do hazardního stavu a SKO spolu se spínačem napájení začnou kmitat. Tyto kmity jsou značně potlačovány blokovacím kondenzátorem C16, který udržuje klesající napětí na napájecí sběrnici SKO i po vypnutí D5. Přesto se zesilovač po vypnutí ještě několikrát krátkodobě zapne, to však nijak nevadí a je to jen kosmetická vada.

Každý přístroj napájený z baterie by měl mít kontrolu stavu (napětí) baterie. V tomto přístroji je napětí baterie indikováno svitem LED D2 označené nápisem STAV BAT. Je použita červená supersvitivá LED, jejíž otevírací napětí je zvyšováno sériovou diodou D1. Při plném napětí baterie 3 V svítí LED silně, při klesajícím napětí jas LED slabne a při poklesu napětí pod 2 V je LED zhasnutá. Maximální proud LED je omezován rezistorem R16, rezistor R15 přispívá k ostřejšímu přechodu z rozsvíceního do zhasnutého stavu. Aby LED



Obr. 5. Pohled shora do otevřené skříňky zesilovače šumu

vybíjela baterii co nejméně, připojuje se k baterii přes zapínací tlačítko TL1, takže svítí jen při stisknutí tohoto tlačítka.

Jak je vidět ze schématu, při uvolněním tlačítka a vypnutých tranzistorech T5 a T6 je baterie vybíjena jen zbytkovým proudem křemíkových tranzistorů T5 a T6, který je zcela zanedbatelný. Proto při pouze občasném využívání zesilovače šumu má jeho alkalická baterie životnost deset let a více, takže na ni můžeme „zapomenout“.

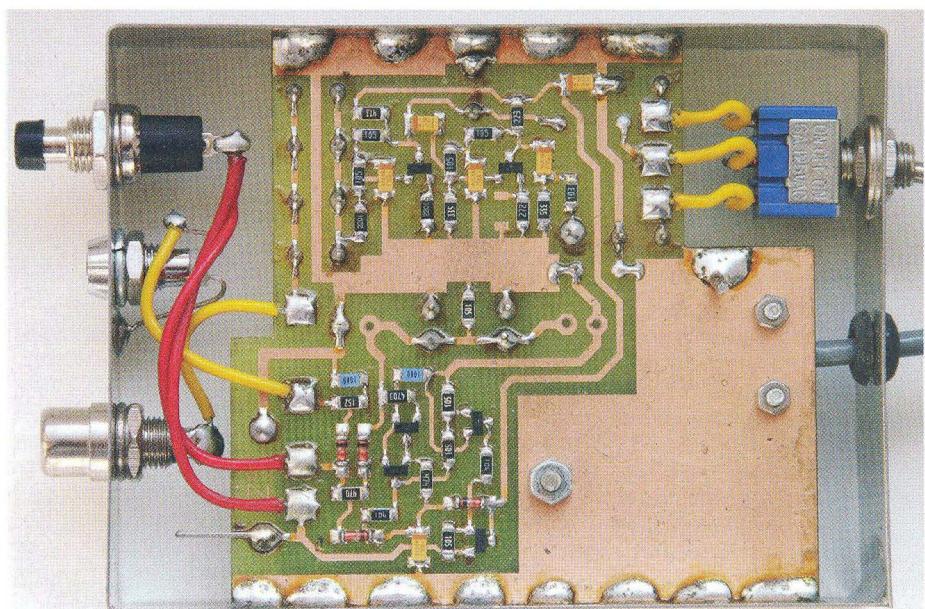
Konstrukce a oživení

Zesilovač šumu je zkonstruován ze součástek pro povrchovou montáž (SMD) a z několika vývodových součástek, které jsou připájené na desce ZS s jednostrannými plošnými spoji.

Deska s plošnými spoji je na obr. 2, rozmištění součástek SMD na straně

spojů je na obr. 3, rozmištění vývodových součástek na straně součástek je na obr. 4.

Na desku nejprve připájíme součástky SMD a pak vývodové součástky. Dáme si pozor, abychom nezměnili hodnoty součástek a polaritu diod a elektrolytických kondenzátorů. Na desce jsou dvě drátové propojky zhotovené z odstřížených vývodů vývodových rezistorů. Držák dvou článků AAA přišroubujeme k desce šroubem M2,5. Pájecí očka na držáku spojíme s deskou propojovacími dráty rovněž odstříženými z vývodových rezistorů. Dráty k pájecím očkům pájíme opatrně s použitím dobré „pájecí vodičky“, aby se neroztavila plastová hmota držáku a neuvolnily se nýty upevňující očka k držáku. Po pájení pečlivě otřeme rozstříkanou „pájecí vodičku“ hadříkem namočeným v lihu, aby nemohla způsobit korozi potřísněných kovových částí.



Obr. 6. Pohled zdola do otevřené skříňky zesilovače šumu

Osazenou desku vestavíme do stínící krabičky U-AH102 z pocínovaného plechu, která má rozměry přibližně 92 x 67 x 22 mm a lze ji zakoupit v prodejnách GM Electronic. Desku připájíme do obvodového rámečku skříňky tak, že strana spojů desky je od okraje rámečku vzdálena 6 mm. Umístění desky v rámečku není kritické, vodítko poskytuje obr. 5 a 6. Dbáme na to, aby po zapojení desky byl rámeček pravoúhlý!

Před zapojením desky vyvrtáme do rámečku díry pro TL1, LED D2, K1Z, SW1 a výstupní kablík KAB1. Díry leží na podélných osách užších stěn rámečku a mají průměr podle použitých součástek. Rozmístění děr rovněž vyplývá z obr. 5 a 6.

Po připájení desky do rámečku přišroubujeme do děr příslušné součástky a propojíme je s odpovídajícími pájecími ploškami na desce. K propojení použijeme různobarevná tenká lanka s izolací PVC. LED D2 zasuneme do kovového pouzdra L-R732G (prodává se v GM), ze kterého jsme odstranili původní LED.

Stěny rámečku nejsou příliš pevné a při zatlačení na ovládací prvky se prohýbají. Kdo by chtěl užší stěny rámečku zpevnit, může je podložit další vrstvou pocínovaného plechu, který se na ně zevnitř připejaje. Díry se pak vyrůtají skrz obě vrstvy.

KAB1 je koaxiální kablík s charakteristikou impedancí 75 Ω o průměru 3 mm a délce asi 1,5 m. Lze použít i kablík 50 Ω, ten má však při stejném průměru větší měrnou kapacitu. Do díry v rámečku pro kablík je vložena gumová průchodka, aby se kablík o ostrou hrani plechu nepoškozoval. K desce je kablík připevněn plechovou sponou ve tvaru můstku, která je k desce přišroubována dvěma šrouby M2 (viz obr. 5). Vzdálený konec kablíku je opatřen vidlicí BNC.

Po zapojení všech součástek a spojů přístroj oživíme. Oživení je snadné, protože se nic neseřizuje. Vyzkoušíme pouze, že se měřicí šumu tlačítkem zapíná, že svítí LED a že ne signál prochází zesilovačem. Můžeme změřit čas, po kterém se vypne, a pomocí tónového generátoru a osciloskopu můžeme zkontrolovat velikost zesílení (a případně ji upravit změnou odporu rezistorů R10A a R10B), kmitočtovou charakteristiku, zkreslení apod. Zhotovený vzorek pracoval bez problémů na první zapojení.

Po oživení přístroje zkompletojeme krabičku nasunutím stínicích víček (spodního a vrchního). Na vrchní víčko nalepíme štítky s popisem ovládacích a dalších prvků. U vzorku jsou štítky vytiskeny na kancelářský papír laserovou tiskárnou a jsou přilepeny oboustranně lepící páskou. Před přilepením jsou štítky oříznuty podle pravítka ostrým nožem s lámací čepelí.

Pro snadné připojení zesilovače šumu k měřenému objektu si ještě zhotovíme měřicí kablíky.

Jeden měřicí kablík může vypadat tak, že do vidlice CINCH (která se zasuňe do vstupní zásuvky CINCH K1Z) připájíme dvě lanka o délce 50 až 100 mm s izolací PVC a konce těchto lanek opatříme izolovanými krokosvorkami. Lanka barevně rozlišíme, zemní lanko je zelené, živý přívod je červený.

Druhý měřicí kablík zhotovíme s měřicím hrotem, abychom mohli kontaktovat obvody, ke kterým nelze uchytit krokosvorku. Na střední vývod vidlice CINCH připájíme zaostřený měřicí hrot, který bude vyčnívat 30 až 50 mm z plastového pouzdra vidlice. Zemní přívod realizujeme lankem o délce asi 100 mm se zelenou izolací PVC. Lanko zakončíme izolovanou krokosvorkou.

Závěr

Pomocí popsaného zesilovače byl měřen šum mnoha napěťových referencí a regulátorů (stabilizátorů) napětí a mohly být porovnávány vlastnosti nejen různých typů, ale i různých kusů téhož typu od různých výrobců. Bylo zjištěno, že běžné regulátory (např. 7812) mají nejméně o řád silnější šum než reference a naprostě nejsou vhodné pro stabilizaci ladícího napětí pro varikapy v rádiových přijímačích nebo v generátozech, i když v řadě publikovaných zapojení se pro tento účel používají. Také bylo shledáno, že různé napěťové reference mají velmi rozdílné šumové vlastnosti. Díky popisovanému zesilovači však bylo možné pro stabilizaci ladícího napětí vybrat ty s minimálním šumem.

Autor nedodává žádné stavebnice tohoto přístroje ani žádné součástky nebo desky s plošnými spoji.

Literatura

[1] Doležílek, J.: AM generátor. PE 5 až 7/2011.

Seznam součástek

Deska SZ

| | | | |
|------|----------------------|------|---|
| R1 | 2,2 kΩ/1 %, SMD 1206 | R15 | 10 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R2 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 | R16 | 1,5 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R3 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 | R17 | 47 Ω/1 %, SMD 1206 |
| R4 | 47 kΩ/1 %, SMD 1206 | R18 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 |
| R5 | 2,2 kΩ/1 %, SMD 1206 | R19 | 470 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R6 | 3,3 MΩ/1 %, SMD 1206 | R20 | 470 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R7 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 | R21 | 10 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R8 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 | R22 | 100 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R9 | 22 kΩ/1 %, SMD 1206 | R23 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 |
| R10A | 2,7 kΩ/1 %, SMD 1206 | R24 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 |
| R10B | nepoužit | R25 | 1 MΩ/1 %, SMD 1206 |
| R11 | 3,3 MΩ/1 %, SMD 1206 | R26 | 100 kΩ/1 %, SMD 1206 |
| R12 | 10 kΩ/1 %, SMD 1206 | | |
| | | C1A | 1 μF/J/63 V, CF1 |
| | | C1B | 1 μF/J/63 V, CF1 |
| | | C1C | nepoužit |
| | | C1D | nepoužit |
| | | C2 | 10 μF/6,3 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| | | C3 | 4,7 μF/10 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| | | C4 | 10 μF/6,3 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| | | C5 | 10 μF/6,3 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| | | C6 | 100 pF/NPO, SMD 1206 |
| | | C7 | 15 nF/J/100 V, CF2 |
| | | C8 | 470 nF/J/63 V, CF1 |
| | | C9 | 10 μF/6,3 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| | | C15A | 470 μF/10 V/105 °C, radiální (Ø 8 x 11 mm) |
| | | C15B | 470 μF/10 V/105 °C, radiální (Ø 8 x 11 mm) |
| | | C15C | 470 μF/10 V/105 °C, radiální (Ø 8 x 11 mm) |
| | | C15D | 470 μF/10 V/105 °C, radiální (Ø 8 x 11 mm) |
| | | C16 | 10 μF/6,3 V, SMD, tantalový, rozměr A |
| D1 | 1N4148, SMD | D2 | LED červená super-svítivá, 3 mm, čirá, bodová |
| D3 | 1N4148, SMD | TL1 | tlačítko spínačí, T 250A/0 (GES) |
| D4 | 1N4148, SMD | SW1 | páčkový přepínač, jednopólový, třípolohový ON-OFF-ON |
| D5 | 1N4148, SMD | K1Z | zásuvka CINCH, na panel |
| T1 | BC850C (2G), SOT23 | K2V | vidlice BNC, na kabel |
| T2 | BC850C (2G), SOT23 | K3 | pouzdro 2x AAA |
| T3 | BC850C (2G), SOT23 | KAB1 | koaxiální kabel |
| T4 | BC850C (2G), SOT23 | | 75 (50) Ω, průměr 3 mm, délka 1,5 m |
| T5 | BC850C (2G), SOT23 | | Kovové pouzdro s LED L-R732G (GME), viz text |
| T6 | BC860C (4G), SOT23 | | Krabička z pocínovaného plechu U-AH102 (92 x 67 x 22 mm) (GM) |

Ostatní součástky

LED červená super-svítivá, 3 mm, čirá, bodová tlačítko spínačí, T 250A/0 (GES) páčkový přepínač, jednopólový, třípolohový ON-OFF-ON zásuvka CINCH, na panel vidlice BNC, na kabel pouzdro 2x AAA koaxiální kabel 75 (50) Ω, průměr 3 mm, délka 1,5 m Kovové pouzdro s LED L-R732G (GME), viz text Krabička z pocínovaného plechu U-AH102 (92 x 67 x 22 mm) (GM)