

Zesilovač 20 W ve třídě A

Zdeněk Kotisa

Zapojení tohoto poněkud výjimečného zesilovače pochází z dílny známého konstruktéra pana J. L. Hoodse a vzniklo již v téměř identické podobě někdy v roce 1969. Vyznačuje se značnou jednoduchostí, možnými ekvivalenty součástek, které jsou právě k dispozici a v neposlední řadě i velmi jednoduchým postupem při uvádění do chodu, takže je vhodné i pro naprosté elektronické laiky.

toru tak, aby zde bylo napětí rovné polovičnímu napětí zdroje.

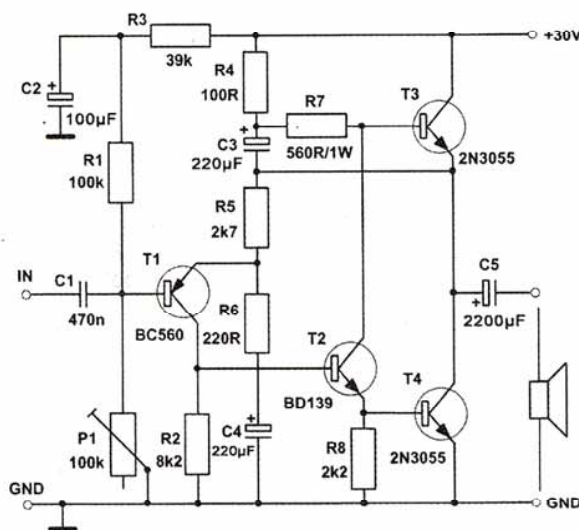
Jak již bylo řečeno, tento zesilovač pracuje ve třídě A. Znamená to, že zesilovač odebírá stálý, dosti velký proud ze zdroje a je tedy třeba volit pro chlazení tranzistorů T3, T4 a T6 dosti velký chladič. Toto je jediná nevýhoda tohoto zesilovače - jeho účinnost dosahuje jen asi 20%. Ostatní parametry jsou vzhledem k jednoduché konstrukci velice

kondenzátorem C6 přivádí na tranzistor T6 ve funkci sériového stabilizátoru s budičím tranzistorem T5. Trimrem P2 je možno výstupní napětí v malých mezích nastavovat. Nastavíme je tak, aby bylo rovno 30 V na emitoru T6.

Konstrukce zesilovače je rovněž jednoduchá: napájecí zdroj i vlastní zesilovač jsou montovány na jedné desce plošných spojů. Do bodů Tr1 připojíme sekundární napětí síťového transformátoru. Tranzistory T3, T4 a T6 jsou izolovaně upevněny na hliníkový úhelník 30x30, příp. 40x40 mm. Zde použijeme pro montáž slídové izolační podložky a izolační průchodky pro odizolování upevňovacích šroubů. Na kolmou stranu úhelníku pak přišroubujeme dosti velký chladič. Tranzistory T2 a T5 jsou rovněž opatřeny malými chladiči ve tvaru písmene U.

Při provozu kontrolujeme zahřívání chladiče koncových tranzistorů - pokud by se chladič přehříval, je třeba zvolit větší plochu chladiče, nebo snížit napájecí napětí. To má ovšem za následek i snížení výstupního výkonu. Zesilovač by měl mít vstupní citlivost kolem 1 V, takže pro většinu aplikací bude třeba předřadit předzesilovač.

Pro zájemce o stavbu stereofonní verze několik poznámek: budete potřebovat dvě destičky plošných spojů. Při napájení stereofonní verze máte dvě možnosti: jednodušší je ta, při které na druhé destičce neosadíte součástky napájecího zdroje. Oba zesilovače pak budou napájeny z jednoho zdroje, nebo je možná druhá verze: destičky budou kompletně osazeny, takže každý kanál bude mít vlastní zdroj. Síťový transformátor může pak mít dvě stejné sekce po 30 V. Tato druhá verze je běžná při konstrukci zesilovačů nejvyšší kvality, výsledný efekt je zcela nezávislá funkce obou kanálů zesilovače. Plošný spoj a osazovací výkres tohoto zesilovače najdete na obr. č. 3 a 4.

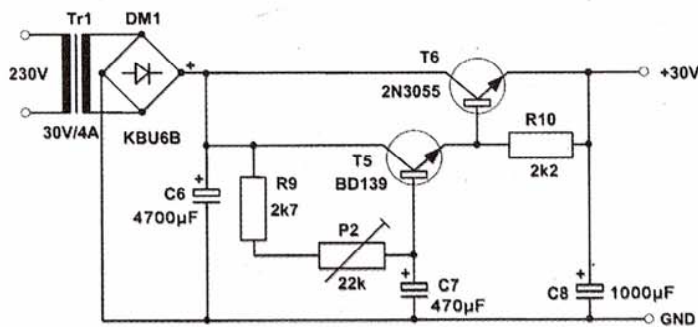


Obr. 1. Zapojení zesilovače 20 W ve třídě A

Do dnešního dne bylo toto zapojení nespočetněkrát upravováno a modifikováno. Ve stručnosti několik slov k jeho zapojení - viz obr. č. 1. Vstupní signál přichází přes vstupní kondenzátor C1 na bázi tranzistoru T1. Tento zajišťuje celkové zesílení zesilovače a to poměrem rezistorů R5/R6. Tranzistor T2 pracuje jako emitorový sledovač s jednotkovým zesílením, T4 jako koncový zesilovač a T3 tvoří zdroj konstantního proudu. Po zapnutí napájecího napětí nastavíme pomocí trimru P1 napětí na + pólu kondenzá-

dobré. Patří mezi ně zejména prakticky nulové přechodové zkreslení, typické pro zesilovače ve třídě B a AB, dále velká šířka přenášeného pásma, stabilita zapojení pro různé typy zátěže (z toho důvodu bylo možno vypustit i obvyklý Boucherotův člen na výstupu) a díky zdroji konstantního proudu i značná linearita zapojení.

Napájecí nesymetrický zdroj tohoto zesilovače je zcela přehledný - viz obr. č. 2. Sekundární napětí 30 V ze síťového transformátoru se po usměrnění diodovým můstkem DMI a filtraci



Obr. 2. Napájecí zdroj zesilovače 20 W ve třídě A

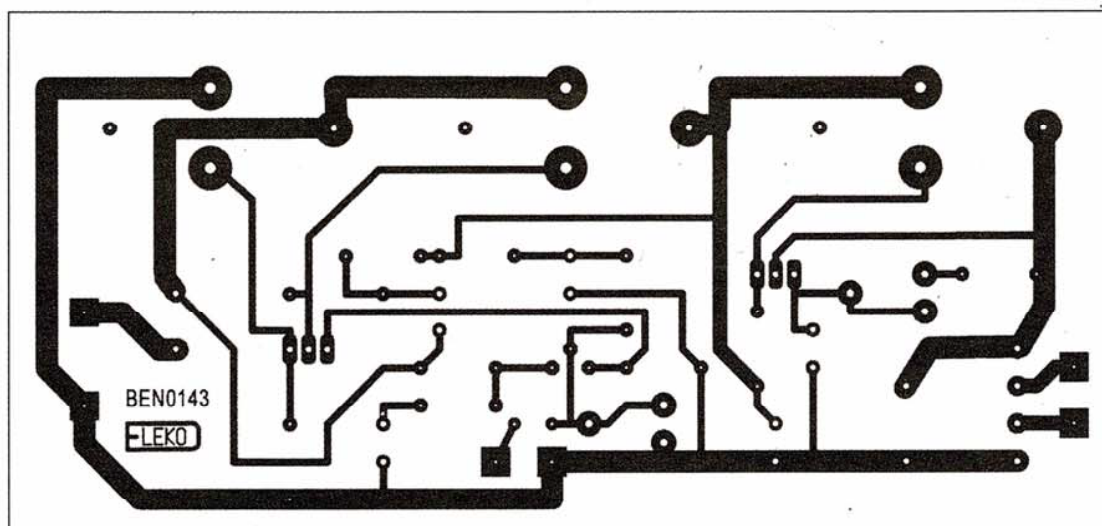
Seznam použitých součástek

Rezistory:

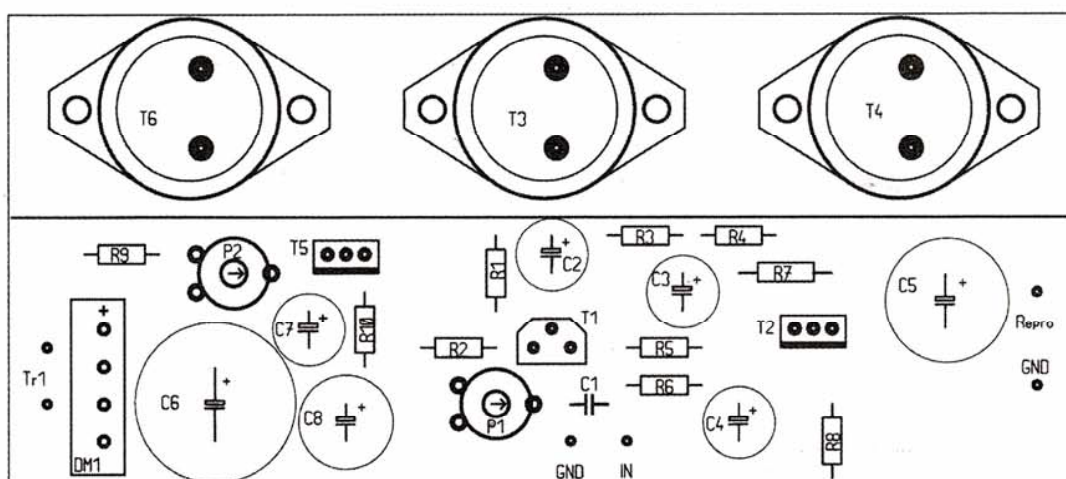
R1	100k
R2	8k2
R3	39k
R4	100 R
R5, R9	2k7
R6	220 R
R7	560 R/1 W
R8, R10	2k2
P1	ležatý trimr 100k
P2	ležatý trimr 22k

Kondenzátory:

C1	svitkový 470n/63 V MKT RM 5 mm
C2	elektrolytický radiální 100 µF/35 V
C3, C4	elektrolytický radiální 220 µF/25 V



Obr. 3. Plošný spoj zesilovače 20 W ve třídě A a zdroje - BEN0143



Obr. 3. Plošný spoj zesilovače 20 W ve třídě A a zdroje - BEN0143

- C5 elektrolytický radiální
2200 μ F/25 V
- C6 elektrolytický radiální
4700 μ F/50 V
- C7 elektrolytický radiální
470 μ F/35 V
- C8 elektrolytický radiální
1000 μ F/50 V

Polovodiče:

- T1 tranzistor BC560
- T2, T5 tranzistor BD139
- T3, T4, T6 tranzistor 2N3055
- DM1 diodový můstek KBU6B
100 V/6 A, příp. 10 A
pro stereofonní verzi

Ostatní díly:

Síťový transformátor 230/30 V - 4 A
Izolační slídové podložky
a průchodky, šroubky, cladiče - viz text

Poznámka redakce

Příspěvek je reprintem textu z knihy Zdeňka Kotisu NF zesilovače - 3. díl, tranzistorové výkonové zesilovače, vydané Nakladatelstvím BEN - technická literatura, Věšínova 5, Praha 10, v roce 2003. Text je uveřejněn se souhlasem původního vydavatele.

Další informace k zapojení, ke konstrukci, nastavení či inspiraci k možnému mechanickému řešení a modifikacím zapojení možno najít i na internetových stránkách:

John Linsley Hood 1969 Class A Amplifier aka Nobsound NS-02g

(<https://jelabs.blogspot.com/2019/03/john-linsley-hood-1969-class-amplifier.html>)

Simple Class-A Amplifier based on the original article by John Linsley-Hood

(https://sound-au.com/jlh_hood.htm)

Simple Class A Amplifier by JL Linsley Hood Wireless World Dec 1970 Jlh1970

(<https://www.scribd.com/document/298195862/Simple-Class-a-Amplifier-by-JL-Linsley-Hood-Wireless-World-Dec-1970-Jlh1970>)

Linsley Hood simple class A amplifier designs (1969, 1996)

(<https://www.angelfire.com/sd/paulkemble/sound3b.html>)

Simple Class A Amplifier. A 10-W design giving subjectively better results than class B transistor amplifiers

(<https://diagramas.diagramasde.com/audio/Linsley%20Hood%20Class.pdf>)



Širokopásmový milivoltmetr

Ing. Petr Jeníček

Tento přístroj s ručkovým měřidlem slouží k měření střídavého napětí o frekvenci od 65 Hz do 5 MHz, s horší přesností až do 30 MHz. Má lineární stupnici. Lze ho použít samostatně, ale je vhodný i pro vestavbu do složitějších přístrojů.

Technické údaje

Rozsah měření 0 - 100 mV ef. Přístroj měří střední hodnotu sinusového napětí, ale je cejchován v efektivní hodnotě.

Frekvenční rozsah a přesnost:

50 Hz - 65 Hz nelinearita menší než 1%, celková chyba včetně nepřesnosti měřidla < 4%

65 Hz - 5 MHz nelinearita < 1%, celk. chyba < 2,5%

5 MHz - 10 MHz nelinearita < 2%, celk. chyba < 4%

10 MHz - 30 MHz nelinearita < 4%, celk. chyba < 6%

Vstupní impedance cca 2 kΩ na nízkých kmitočtech do 5 MHz.

Napájecí napětí: 12±0,5 V. Napětí musí být vyhlazené.

Spotřeba 35 mA

Popis zapojení

Schema vidíte na obr. 1. Tranzistor Q1 slouží jako zesilovač a odděluje vstup od lineárního usměrňovače s tranzistorem Q2 a diodami D1 a D2. Nejprve popíši lineární usměrňovač, v popisu zapojení půjdu neobvykle od konce ke vstupu. Usměrňovač s rychlými Schottkyho diodami D1 a D2 je zapojen jako Greinarchův zdvojnásob,

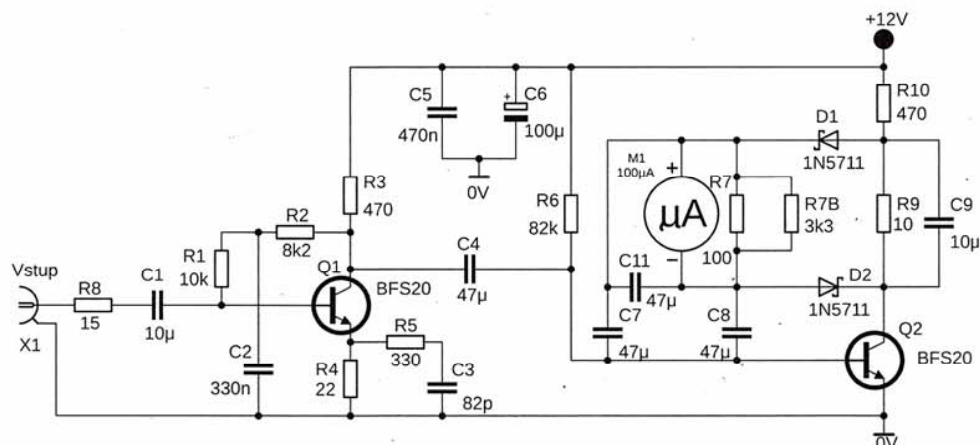
protože v tomto zapojení je menší úbytek napětí na diodách než u Graetzova můstku, a tím se méně uplatní nelinearita diod. Větší spotřeba proudu usměrňovačem nevadí.

Usměrňovač je zařazen do obvodu záporné zpětné vazby zesilovače, tvořeného tranzistorem Q2. Použil jsem jednostupňový zesilovač, udělaný tak, aby měl co největší zesílení a šířku pásma. V širokopásmovém usměrňovači nebo zesilovači je nejlepší vést zápornou zpětnou vazbu jen přes jeden stupeň, obvod je dobře stabilní i při velké šířce pásma. Nevýhodou je menší zesílení ve smyčce, a tím i méně účinná korekce nelinearity diod. Jeden zesilovací stupeň s tranzistorem po překročení horního kmitočtu přenášeného pásma zmenšuje zesílení se strmostí 6 dB/oktávu a posouvá fázi o necelých 90°. Pokud se fáze v uzavřené smyčce zpětné vazby posune o 180° a zesílení ve smyčce je větší než 1, obvod se rozkmitá, protože se záporná zpětná vazba změní v kladnou (Nyquistovo kritérium stability). Pokud jde záporná vazba přes jeden zesilovací stupeň, fázový posuv je nad horním koncem pásma okolo 90° a obvod je vždy stabilní. Pokud vede zpětná vazba přes 2 stupně, fázový posuv se blíží ke 180° a obvod je blízko hranice stability. Odezvou na impuls jsou tlumené kmity a frekvenční charakteristika je zvlněná, což nechceme. Usměrňovač má díky kapacitám diod odporově kapacitní charakter, takže zpětnovazební obvod trochu fázový posuv zmenšuje. Díky tomu může usměrňovač s dvojestupňovým zesilovačem stabilně fungovat i bez přidavného

tlumení jednoho stupně, a někdy se takové zapojení používá. Na druhou stranu mohou fázový posuv zvětšovat neviditelné parazitní kapacity a indukčnosti vodičů a součástek, takže někdy se rozkmitá i zapojení, které by dle schématu a výpočtu mělo být stabilní, pokud je blízko hranice stability. Usměrňovač se zpětnou vazbou přes 2 stupně bez tlumení může fungovat, ale není to žádný zázrak a je tam riziko nestability.

Když vede zpětná vazba přes 3 a více stupňů, snadno může dojít k dosažení fázového posuvu 180° při zesílení ve smyčce nad 1 a rozkmitání obvodu. Konstruktor tomu obvykle brání tak, že tlumícím kondenzátorem nebo RC článkem zmenší šířku pásma některého stupně tak, aby na frekvenci, kde je fázový posuv 180°, už bylo zesílení ve smyčce menší než 1. Tím se ale zúží šířka pásma celého obvodu. Takto bývají řešeny nízkofrekvenční zesilovače se silnou globální zpětnou vazbou a obvody s operačními zesilovači, třeba měřicí usměrňovače s OZ. Třeba OZ MAA748 má vývody pro připojení tlumicího/kompenzačního RC článku, jehož hodnoty se volí podle zesílení obvodu. Operační zesilovače, které takové vývody nemají, mají tlumicí kondenzátor integrován uvnitř. Ten zatluší OZ tak, aby byl stabilní i při výsledném zesílení celého obvodu 1 (když OZ slouží třeba jako sledovač nebo invertor), kdy je celé zesílení OZ, třeba 100 000, uzavřené ve smyčce zpětné vazby. Takže OZ je už z výroby uvnitř hodně zatlušen a je pomalý. Usměrňovač s OZ nebo vícecestupňovým tranzistorovým zesilovačem díky velkému zesílení na nízkých kmitočtech usměrňuje velmi přesně, nelinearita může být menší než 1/1000, takže se hodí třeba k přesnému digitálnímu měřáku. Šířka pásma takového obvodu bývá obvykle jen desítky až stovky kHz, v nejlepším případě jednotky MHz.

Tranzistor Q2 s odporem R10 v kolektoru má bez zpětné vazby napěťové zesílení cca 300, ale po uzavření



Obr. 1. Schéma širokopásmového milivoltmetru

smyčky klesne zesílení pod 1. Díky silné zpětné vazbě se jen málo uplatní nelinearita diod. Tranzistor díky zpětné vazbě vnutí usměrňovači střídavý proud, který je jen o proud báze, tj. cca. o 1/100 menší než ten, který teče na vstup obvodu přes vazební kondenzátor C4. Tento proud díky velkému napětíovému zesílení tranzistoru jen nepatrně závisí na úbytku napětí na usměrňovači, který je nelineární. Nelinearita je tak menší než 1%, což při použití ručkového měřidla stačí. Nelinearita je největší na začátku stupnice.

Kolektorem tranzistoru Q2 teče proud 17 mA, a ten na odporu R9 vytváří úbytek 0,17 V, který předpíná diody D1 a D2 tak, aby k jejich otevření stačilo menší napětí. Tím se dále zlepšuje linearita usměrňovače. Odpor R7 100 Ω , připojený paralelně k měřidlu o citlivosti 100 μ A, zmenšuje jeho proudovou citlivost, takže přes měřidlo a R7 teče při plné výchylce dohromady 1,55 mA. Pro jemné seřízení/zmenšení citlivosti je paralelně k měřidlu připojen ještě další rezistor R7B. Do usměrňovače-zdvojovače tak teče střední proud 3,1 mA, tj. efektivní 3,42 mA. Obvod je navržen tak, aby jím tekla poměrně velký proud a všude byly malé odpory, protože pak se méně uplatí parazitní kapacity součástek a spojů, a obvod pracuje dobře do vyšší frekvence, než při malém proudu. Vysokofrekvenční tranzistory také mají nejvyšší mezní kmitočty při kolektorovém proudu mezi 5 a 20 mA. Poměrně velký proud 17 mA tekoucí kolektorem tranzistoru, což je o dost více než špičkový proud usměrňovače při sinusovém napětí, jsem zvolil také proto, aby obvod dobře změřil i napětí takového průběhu, které má o hodně větší špičkovou hodnotu, než je střední hodnota. To se vyskytuje třeba u amplitudově modulovaného signálu, nebo u videosignálu, který má velké synchronizační impulsy. U takového signálu je třeba brát v úvahu, že přístroj vyhodnocuje střední hodnotu, i když je cejchován v efektivní. U AM signálu přístroj měří velikost nosné vlny a údaj nekolísá v závislosti na modulaci, čehož jsem chtěl dosáhnout.

Bylo by možno použít i měřidlo s horší citlivostí, třeba 1 mA, a R7 byste pak dali větší, aby dohromady teklo měřidlem a R7 1,55 mA. Já jsem použil měřidlo 100 μ A při 141 mV, protože jsem ho měl. Bylo by výhodnější použít měřidlo, které má menší úbytek napětí při větším proudu, třeba právě 1 mA při 60 mV.

Pokud byste potřebovali zmenšit spotřebu přístroje a nevadilo by vám zmenšení šířky pásma, je možno zvětšit všechny odpory a zmenšit proudy tekoucí tranzistory. Je třeba zachovat u obou tranzistorů stejnosměrné napětí $U_{BE}=4$ V. Při menším napětí by mohlo dojít ke kvazisaturaci tranzistoru a tím pádem zmenšení zesílení a mezního

kmitočtu a zvětšení mezelektrodových kapacit. Při větším napětí na kolektoru by se zmenšil úbytek na kolektorovém odporu a tím pádem by kleslo i napětíové zesílení stupně.

Tranzistor Q2 nemá stabilizovaný pracovní bod, jeho proud je nastaven odporem R6. Křemíkový tranzistor mění jen málo své vlastnosti s kolísáním teploty, takže jeho proud a napětí se s teplotou mění jen málo. Silná záporná zpětná vazba zmenšuje vliv nežádoucího kolísání parametrů tranzistoru na minimum.

Pro dobrou funkci lineárního usměrňovače je třeba, aby vstup byl napájen ze zdroje s velkým výstupním odporem, což splňuje zesilovač s Q1. Jeho výstupní odpor je o malinko menší než R3 470 Ω . Díky malé vstupní impedanci lineárního usměrňovače s Q2, způsobené činností zpětné vazby, pracuje tranzistor Q1 téměř do zkratu. Na kolektoru Q1 i bázi Q2 je střídavé napětí jen několik milivoltů.

Zesilovač s Q1 pracuje v zapojení se společným emitorem. Odpor R4 mezi emitorem a zemí vytváří zápornou zpětnou vazbu, která zmenšuje zesílení přibližně 15x, ale také zmenšuje nežádoucí vliv kolísání napájecího napětí a kolísání teploty. Napětíové zesílení nezatíženého stupně by bylo 20, ale kvůli tomu, že je výstup zatížen malým vstupním odporem dalšího stupně, je zesílení menší než 1. Tranzistor Q1 tak funguje spíše jako přesný převodník vstupního napětí na proud, tekoucí do usměrňovacího stupně. Odpor R5 a kondenzátor C3 korigují pokles zesílení na vysokých kmitočtech.

Přes odpory R1 a R2 se přivádí proud do báze Q1 a nastavuje se tak jeho pracovní bod. Pro stejnosměrný proud tyto odpory tvoří zápornou zpětnou vazbu, která stabilizuje pracovní bod. Aby zpětná vazba nepůsobila pro střídavý proud a nezmenšovala vstupní a výstupní impedanci stupně, je tam kondenzátor C2, který svádí střídavý proud do země. Vazební kondenzátor C1 brání průtoku stejnosměrného proudu z odporu R1 do zdroje signálu.

Tlumicí odpor R8 brání divokým oscilacím tranzistoru Q1, které by mohly nastat, kdybyste připojili zdroj signálu, jehož impedance má indukční charakter. Při připojení indukčnosti na vstup bez tlumicího odporu by tranzistor Q1 spolu s neviditelnými parazitními kapacitami mezi bází, emitorem a kostrou mohl začít kmitat jako Colpittsův oscilátor. Zdroj signálu s indukčním charakterem není jen např. hledací cívka nebo rámová anténa, ale také nepřípůsobené vysokofrekvenční vedení.

Dlouhé vedení, které není zakončené jmenovitou impedancí (třeba 50 nebo 75 Ω), má na některých kmitočtech kapacitní charakter a na jiných indukční. Vedení, které není na začátku

přípůsobené a připojíte ho volným koncem na vstup milivoltmetru bez R8, může na frekvenci, na které má indukční charakter, způsobit oscilace. Tomu zabráníte buď zapojením zakončovacího odporu rovného jmenovité impedanci vedení mezi živý vstup milivoltmetru a zem, nebo zapojením R8 mezi konec vedení a vstup milivoltmetru.

Při měření na vysokém kmitočtu je správné vedení zakončit. Dlouhé nepřípůsobené vedení také způsobuje chybu měření, protože na začátku může mít jiné napětí než na konci. Pokud je vedení delší než $\lambda/10$, mělo by být zakončené jmenovitým odporem. Když milivoltmetr při měření v napětí připojíte na konec dlouhého vedení a těsně vedle milivoltmetru je připojen paralelně jiný přístroj či spotřebič v proud, který má vstupní impedanci rovnou jmenovité impedanci vedení, je to také v pořádku a obvod se nerozkmitá, druhý přístroj vedení zakončí, i když tam není samostatný zakončovací odpor.

Při měření nf napětí zakončení vedení jmenovitým odporem není nutné. Použití R8 bez zakončovacího odporu má tu výhodu, že na nízkých frekvencích má voltmetr větší vstupní odpor okolo 2 k Ω . Pokud měříte napětí o nízké frekvenci na zdroji s větším výstupním odporem, než je jmenovitá impedance dlouhého vedení, a nechcete zdroj zatěžovat malým zakončovacím odporem, odpor R8 zabrání rozkmitání obvodu na vysoké frekvenci, která vás momentálně vůbec nezajímá. Pokud by obvod kmital i s R8=15 Ω , tak R8 zvětšíte.

Když víte, že bude zdroj signálu mít vždy odporový charakter a bude připojen jen krátkým spojem o délce několika cm, můžete R8 nahradit kouskem drátu.

Mechanické provedení milivoltmetru

Obvod je zapojen na jednostranné destičce plošných spojů o velikosti 25,4 x 29,2 mm. Spojový obrazec je na obr. 3, rozmístění součástek na horní straně desky na obr. 4 a rozmístění SMD součástek na spodní straně desky na obr. 5. Většina součástek je v provedení SMD, ale některé jsou s drátovými vývody. Na jednostranné spojové desce součástky s drátovými vývody překročí několik spojů a součástek, které se nacházejí na druhé straně. Kombinace SMD a THT součástek umožní na jednostranné spojové desce dosáhnout nejhustší montáže. Vysokofrekvenční a širokopásmové obvody je výhodnější dělat z SMD součástek, protože tyto menší součástky mají menší parazitní kapacity a indukčnosti, a také spoje vycházejí kratší.