

Výkonové tranzistory v nf zesilovačích

1. Úvod

Výkonové tranzistory jsou v koncových nf zesilovačích jednoznačně nejvíce namáhanými prvky, jak teplotně, tak i elektricky. Jejich vhodnou či naopak nevhodnou volbou můžeme dramaticky ovlivnit chování, parametry a hlavně pak provozní spolehlivost nf koncových zesilovačů.

Podrobný popis problematiky používání výkonových tranzistorů v nf zesilovačích by vydal na velmi tlustou knihu.

Protože ale na toto téma mnoho literatury v novějším provedení mnoho napsáno nebylo, pokusíme se tímto článkem vnést alespoň trochu světla do temnoty, jež často okolo výkonových tranzistorů panuje.

Ostatně se můžeme pokusit i vyvrátit některé zakořeněné omyly, které se nejednomu amatéru /i profesionálům/ vymstily a po jejichž příčinách se jakoby neúspěšně pátrá.

Aby rozsah tohoto článku zůstal únosný, zaměříme se pouze na nejdůležitější aspekty jejich používání.

Vzhledem k zaměření a rozsahu tohoto článku se budeme v dalším textu věnovat pouze bipolárním výkonovým tranzistorům. Tranzistory řízené polem představují naprosto odlišnou skupinu s jinými charakteristickými vlastnostmi. Samostatnou kapitolou se také budeme věnovat bipolárním výkonovým tranzistorům v Darlingtonově zapojení.

2. Spolehlivost

Dlouhodobou spolehlivost výkonových tranzistorů v těchto obvodech je objektivně vzato velmi těžké exaktně-matematicky definovat, protože na ni má vliv mnoho faktorů, z nichž jen některé dokáže ovlivnit sám konstruktér zesilovače. Existuje ale několik metod, pomocí kterých lze z běžné sériové produkce předem vyřadit nespolehlivé kusy a současně zajistit, aby i tranzistory průměrné produkce pracovaly v konkrétním zapojení s definovanou spolehlivostí. Mezi jednu z takových metod patří tzv. zahoření či statická stabilizace parametrů tranzistoru, kdy je tranzistor zapojen v obvodu velmi podobném tomu, ve kterém má v budoucnu pracovat a je zatížen hodnotami napětí a proudů, které odpovídají horním mezním stavům daného konkrétního zapojení. Doba trvání takového testu je např. několik stovek hodin, přičemž je stanoveno definované procento /či spíše promile/ poruchovosti či procento změny statických parametrů. To jsou ovšem zkoušky, které provádí výrobce polovodičů určených jen pro průmyslové nebo vojenské účely. Podobné testy na předem vybraných sériích někdy provádí sám výrobce speciálního finálního zařízení. V běžné sériové produkci spotřební elektroniky je při vyráběném množství naprosto nemyslitelné provádět podobná opatření.

Druhou metodou je měření parametrů v dynamickém režimu, kdy pracovní podmínky rovněž odpovídají maximálním hodnotám, stanoveným pro konkrétní typ tranzistoru, případně jsou o definované procento překročeny. Z těchto měření patří k nejdůležitějším měření průrazných napětí jednotlivých přechodů a odolnost proti tzv. sekundárnímu průrazu kteréhokoliv druhu. Takovéto testy provádí jednak výrobce při zavádění nového typu a specifikaci jeho mezních parametrů, ale i namátkově, v průběhu výroby standardních sérií. Výrobci finálních zařízení podobné testy provádějí jen v případech, kdy je požadována velmi vysoká spolehlivost přístroje. K definicím jednotlivých pojmů se dostaneme dále.

3. Není tranzistor jako tranzistor

Situace konstruktéra, amatéra a někdy i profesionála je poněkud ztížena dvěma fakty:

Jeden konkrétní typ tranzistoru může kromě mateřské firmy vyrábět ještě několik alternativních výrobců, z nichž ne každý přistupuje k dodržování výrobní technologie seriózně. Jeden typ tranzistoru od několika různých výrobců může mít shodné základní „papírové“ charakteristické parametry, ale jsou mezi nimi obrovské rozdíly v tzv. zaručovaných mezních hodnotách a v rezervách od výrobce.

Druhým nezanedbatelným faktem, který nepřímo souvisí se současným stavem ve světě, je smutná skutečnost, že výrobci v Číně jsou schopni kromě značkového oblečení, automobilů, spotřební elektroniky, bílé elektrotechniky, značkových prezervativů a značkových plastických trhavin padělat také elektronické součástky. Bohužel i včetně výkonových tranzistorů, procesorů, LCD obrazovek, případně elektrolytických kondenzátorů velkých kapacit známých a renomovaných firem, které jsou jinak ve značkovém provedení velmi drahé.

Některé kopie značkových součástek jsou vzhledově i potiskem tak dokonalé, že je od originálu rozhodně nerozeznáte jen pouhým okem. Odhalit nelegální čínský plagiát lze jen velmi podrobným měřením a několika drsnými testy /které originální tranzistor vždy vydrží, kopie prakticky nikdy/.

Tyto kopie mají zpravidla značně horší vlastnosti /především spolehlivost/ a nelze je v žádném případě zatěžovat až do horních mezí katalogových parametrů, stanovených pro originální značkový typ.

Nejčastěji se vyskytují kopie nejpoužívanějších a známých typů výkonových tranzistorů z japonského vývoje značek SanKen, Toshiba, Hitachi a dalších. Objevily se i velmi mizerné kopie výkonových tranzistorů ON Semiconductor, označené logem M bývalé divize výkonových polovodičů Motorola, nyní ON Semiconductor.

Drzost plagiátorů jde tak daleko, že se objevily např. výkonové tranzistory 2N3773, označené „TOSHIBA“, které ovšem firma Toshiba nikdy nevyráběla a nevyrábí.

Několik stovek typů tranzistorů pochází z oficiální polovodičové produkce dálnovýchodních firem. Nejčastěji jsou to tranzistory jihokorejské firmy KEC, případně jde o modely původně americké firmy Fairchild, která je bohužel již ve vlastnictví jihokorejského polovodičového průmyslu. Tranzistory bývají označené téměř ve shodě se systémem značení původní japonské či americké produkce.

Jde většinou o levnou licenční výrobu zastaralých japonských typů 2SA-2SB-2SC-2SD označené v korejském provedení jen odděleným písmenem K v levém horním rohu označovacího razítka. Vlastní označení typu někdy odpovídá původnímu japonskému, dávno již nevyráběnému vzoru, ovšem někdy jde o korejskou variantu se zcela jinými charakteristickými parametry. Zmíněná firma vyrábí i roztodivné modifikace v různých pouzdrech například legendárního /a velmi zastaralého/ tranzistoru 2N3055, případně MJE2955 a to dokonce i v pouzdru TO220.

Datasheety originálních japonských vzorů zpravidla už nelze nikde najít, protože je původní výrobce dávno vyřadil i z databáze zastaralých typů. Tak je tomu např. u spínacího výkonového tranzistoru 2SC4503, který naposledy vyráběla firma SanKen v roce 1991 - ve finálních výrobcích z jihovýchodní Asie se ale tento tranzistor objevuje stále a to dokonce s logem firmy SanKen. Můžeme si tedy domyslet, kde a na jaké úrovni se asi teď vyrábí. Někdy lze najít jen datasheety licenčních typů, „papírové“ parametry zhruba odpovídají originálnímu typu, skutečnost je ovšem poněkud jiná.

Je to materiál, téměř výhradně určený pro nejlevnější druh spotřební elektroniky, jejíž životnost zpravidla jen velmi málo přesahuje záruční dobu.

Naznačuji tím fakt, že materiál pro výrobu elektroniky s omezenou životností musí sám mít omezenou životnost. Lze toho dosáhnout několika velmi zákeřnými metodami, z nichž ty nejmírnější jsou např. záměrné použití surovin s horší čistotou, menší průřezy vodičů k čipu, jiný materiál základny apod.

Jestliže Vám tedy v prodejně /či v e-shopu/ nabídnou tranzistory MJ15003/MJ15004 poprvé za 90Kč/ks a podruhé za 49Kč, bez rozmyšlení sáhněte automaticky po dražší variantě a nenechte se oblbout tvrzením prodavačů či systému, že levnější druh pochází od „jiného-alternativního výrobce“. Jde v 99% případů o čistý podvrh, levný a mizerný čínský plagiát, nemající s originálem od firmy ON Semiconductor nic společného.

Zkušenosti, sdělované návštěvníky různých internetových konferencí potvrzují, že se tomu tak běžně děje a poslední dobou stále ve větší míře.

Důležitým místem je také obchod, kde tranzistory nakupujete. U dobrých obchodníků lze najít téměř výhradně jen značkové, originální typy polovodičových součástek. Bohužel je ale pořád ještě dost obchodníků /někdy jsou to i dosti velké firmy/, kde bez skrupulí nabízejí levné kopie originálů, pravidelně bez upozornění na tento fakt.

Vřele doporučuji se těmto obchodníkům obloukem vyhnout, nechcete-li si přivodit zbytečné problémy.

Ve Vašem vlastním zájmu také doporučuji zkontrolovat si vyhledávačem katalogových listů /datasheetů/, kdo je originálním výrobcem dotyčného typu, který hodláte zakoupit. Pokud tak neučiníte, můžete si radostně domů přinést padělek. Výborným vyhledávačem je např. datasheetcatalog.com.

Pokud se Vám už nešťastným řízením osudu, nebo vlastní blbostí podaří podobné tranzistory zakoupit, nehleďte pro ně žádnou, byť sebemeně náročnou aplikaci a raději je vyhodte. Jejich použití je vždy spojeno s problémy, je riskantní a časem se vymstí. Jinými slovy řečeno – nenapadá mě vůbec žádná aplikace, pro kterou by shora uvedené plagiáty tranzistorů, či případně čínsko-korejské skvosty mohly být dobré.

V každém případě doporučuji /bez ohledu na cenu/ nakupovat zcela zásadně jen polovodiče renomovaných výrobců jako jsou ST Microelectronics, ON Semiconductor, SanKen, Diotec a dalších velkých výrobců. Jejich výrobky mají bezpečně garantované parametry podle katalogových listů včetně nezbytných rezerv, jsou dlouhodobě velmi spolehlivé, navzájem se i kusy z různých sérií velmi málo liší /výhoda pro případné párování/ a při stavbě zesilovačů s nimi nebudete mít žádné potíže.

4. Definice rezerv a mezních hodnot

Určují maximální hodnoty proudů, napětí a výkonů, jakými je možno konkrétní typ tranzistoru za daných podmínek zatížit, aniž by došlo k nevratné poruše jeho funkce.

Míra využívání těchto maximálních hodnot je závažným problémem a má bezprostřední vztah k provozní spolehlivosti tranzistorů.

Tak, jako není účelné, žádoucí a bezpečné trvalé využívání např. maximálních otáček motoru automobilu, není účelné ani bezpečné trvale využívat mezních hodnot, stanovených pro standardní /netříděné/ typy polovodičových součástek.

Rezervu mezních hodnot tranzistoru je možno obecně rozdělit na dvě části - na rezervy výrobce a na rezervy u uživatele.

Rezerva výrobce : v technické dokumentaci není obsažena a ani nikde jinde se neuvádí. Je to rozdíl mezi hodnotami absolutními a hodnotami zaručovanými.

Absolutními mezními hodnotami rozumíme hodnoty, při jejichž překročení /kterékoli z nich/ následuje bezprostřední destrukce systému nebo nevratná degradace některého parametru.

Rezerva výrobce není nikdy konstantní a může se značně lišit i u stejného typu tranzistoru, ale různých výrobních sérií, přičemž základní zaručované hodnoty jsou shodné.

Výkonové tranzistory TESLA měly tuto rezervu výrobce dosti značnou a proto je bylo možné úspěšně vybírat - "vyměřovat" a s rozumnou spolehlivostí i provozovat relativně daleko za hranici zaručovaných katalogových parametrů. Bylo to způsobeno značným rozptylem výroby a to dokonce i jednotlivých kusů z jedné výrobní série. Tak tomu bylo např. u populárních KD607/617, KD503, KD3773 a dalších.

Jako perličku je možno uvést, že tranzistor TESLA KD3055 /licenční typ/ jako jediný přežil srovnávací a závěrečné destrukční testy při testování typu 3055 od několika výrobců.

U moderních výkonových tranzistorů současné produkce, které mají výrobní rozptyl tak malý, že se např. nemusí při paralelním řazení vybírat, je tato rezerva také, ale podstatně menší. Mezi jednotlivými sériemi i kusy je rezerva víceméně konstantní a není radno jí vůbec využívat - přestože při měření třeba zjistíte, že existuje rezerva v napětí Uce max např. 40%.

Rezervou výrobce mohou být také diferencovány tranzistory pro spotřební a průmyslovou elektroniku, tranzistory pro průmyslové použití mají zpravidla tuto rezervu parametrů větší.

Rezerva uživatele : Je rozdíl mezi zaručovanou mezní hodnotou parametrů a hodnotami skutečně použitými v daném zapojení a v daných pracovních podmínkách. Velikost této rezervy má být úměrná požadavkům na provozní spolehlivost. U výkonových tranzistorů je nejdůležitější rezerva v mezním ztrátovém výkonu, pak v mezních napětích a poté v mezních proudech. Rezerva mezního ztrátového výkonu pochopitelně závisí na použitých napětích, proudech a provozních teplotách, vztahy udává graf, nazývaný bezpečná pracovní oblast /safe operating area - SOA/ a graf redukce ztrátového výkonu /power derating/ v závislosti na teplotě čipu.

V aplikacích, kde jsou velké nároky na provozní spolehlivost, je používána rezerva ztrátového výkonu až 50%, rezerva v mezním napětí okolo 30%, rezerva v mezním proudu nebývá kritická a používá se okolo 10%.

5. Výrobce doporučené použití

Výrobce s ohledem na mezní a charakteristické parametry, na rezervy tranzistoru a technologii výroby v katalogovém listu určuje nejvhodnější použití. U tranzistorů pro nf zesilovače je někdy uveden i maximální doporučený výkon zesilovače při použití jedné dvojice tranzistorů, pracující ve dvojitě třídě AB a při definovaných pracovních podmínkách.

Pokud se po prostudování katalogového listu konkrétního tranzistoru např. dočtete, že je určen spolu se svým komplementárním protějškem pro zesilovače do výkonu např. 50W, je velmi dobré toto doporučení plně respektovat – výrobci mají pro svá doporučení velmi dobré důvody.

Existuje totiž obrovský konstrukční rozdíl mezi výkonovými tranzistory pro lineární režimy a pro režimy spínací. U některých druhů a typů tranzistorů se sice mohou oba způsoby použití prolínat, ovšem vždy na úkor některého parametru nebo vlastnosti, neexistuje tranzistor zcela univerzální. Jistou univerzální skupinou jsou výkonové tranzistory, nazvané výrobcem „gold standard“.

Tak například tranzistor, určený pro koncové stupně nf zesilovačů lze bez problému použít i v lineárním napájecím zdroji. Ve zdroji spínaném ovšem už bude na závadu jeho poměrně malá rychlost /nízký mezní kmitočet Ft, do cca 5MHz, pouze u spec. typů více/ a dlouhé spínací a rozpínací časy. Ostatní parametry tranzistoru přitom mohou bohatě vyhovovat.

Naopak, u vysloveně určených spínacích tranzistorů, použitých v nf koncovém zesilovači bude na závadu jejich velmi vysoký mezní kmitočet /někdy i přes 50MHz/ a nelinearita proudového zesilovacího činitele /zvláště při malých proudech/, které se zpravidla projeví nestabilitou a neodstranitelným vf zakmitáváním zesilovače.

Typické spínací tranzistory většinou nemají charakterizovanou oblast bezpečného provozu /safe operating area - SOA/, pokud mají, je charakteristická brzkým zlomem křivky již u nižších napětí. Tyto tranzistory mají tenkou, úzkou bázi, relativně malou plochu vlastního čipu, velmi malou odolnost proti tzv. sekundárnímu průrazu a sekundárnímu tepelnému průrazu /viz dále/, takže mají v nf koncovém zesilovači i velmi krátkou životnost.

Ovšem ani tato prokazatelná fakta nezabránila začátkem 70. let minulého století konstruktérům československé firmy TESLA, aby vysloveně spínací tranzistory řady KU605-607 a průmyslový typ KUY12 použili v nízkofrekvenčních koncových zesilovačích. V zájmu objektivit je ale třeba uvést, že byly používány do výkonu maximálně 30W/4Ω, jejich nasazení bylo oprávněně zdůvodňováno snahou o modernizaci a zlepšení parametrů /při přechodu z germaniových tranzistorů na křemíkové/ a také faktem, že v oné době žádné jiné výkonové křemíkové tranzistory na tuzemském trhu nebyly. Dovoz specializovaných výkonových tranzistorů pro nf zesilovače řady BD, TIP nebo 2N z nesocialistického zahraničí byl do tehdy socialistického Československa mimořádně obtížný až nemožný, pokud už byl v několika tisících kusů realizován, tak nikdy pro civilní nebo soukromý sektor. Patnáct let výprodejové, zastaralé a velmi levné tranzistory TESLA řady KU a KUY se objevovaly dokonce i v některých stavebnicích pro amatéry a někteří dodavatelé těchto stavebnic tyto tranzistory používali i pro výkony, nad nimiž normálnímu technikovi, obeznámenému s touto problematikou, zůstával rozum stát. Doufejme, že tato doba je už za námi a materiál tohoto druhu navždy zmizí v propadlišti dějin.

V současnosti se často v prodejních nabídkách některých firem objevují konstrukce nízkofrekvenčních koncových zesilovačů, dokonce ve formě kompletních stavebnic nebo modulů /například firma EZK Rožnov pod Radhoštěm/, které jsou na koncových stupních osazeny tranzistory v Darlingtonově zapojení, určenými původně pro spínací účely. Jsou to tranzistory velmi levné a poměrně snadno dostupné /to je nejspíše hlavní důvod jejich používání/, vyrábí je v různé kvalitě spousta výrobců, leč pro nf koncové zesilovače většího výkonu jsou naprosto nevhodné. Většina z nich nemá výrobcem specifikován mezní kmitočet Ft ani jeho závislost na kolektorovém proudu, mnohdy není vůbec specifikována SOA a až na několik výjimek se nevyrábí s dovoleným napětím Uce max nad 100V. Jde především o tranzistory typu TIP132/137, TIP142/147, BDW83/84, BDX53/54, BDX33/34, MJ11015/11016, starší typy MJ2501/3001, MJ4032/4035 a další.

Jejich základní dovolené parametry sice na první pohled vypadají velmi dobře /velký kolektorový proud, výkonová ztráta/, ale díky nespecifikované oblasti SOA a vnitřní konstrukci je jejich odolnost proti sekundárnímu průrazu zoufale nízká.

Často tak dochází k „odchodu“ tohoto druhu tranzistorů i při zdánlivém nevyužití jejich mezních parametrů.

Pouze v případě, že jsou tyto Darlingtonovy tranzistory použity v nf koncových zesilovačích s výkonem několika málo desítek wattů, lze jejich spolehlivost udržet na rozumné hranici.

Rozhodně je nelze využívat stejným způsobem, jako typické nf tranzistory, přímo určené pro koncové stupně nf zesilovačů.

Odolnost proti sekundárnímu průrazu je vlastnost výkonového tranzistoru pro použití v koncovém stupni nf zesilovače velmi důležitá. Tranzistory pracují v dynamickém režimu, vlivem signálových špiček dochází k rychlému lokálnímu ohřevu čipu a ten musí být schopen svou tepelnou kapacitou, ve spolupráci s tepelnou kapacitou podložky toto rychle vzniklé teplo odvést. Pakliže je plocha čipu malá /běžné u spínacích tranzistorů/, je i tepelná kapacita velmi malá a už při lehkém proudovém přetížení dojde k lokálnímu přehřátí a protavení struktury.

Tranzistory, přímo určené pro koncové stupně nf zesilovačů mají v technických podmínkách tento režim specifikován, je vyjádřen v grafu SOA a přímo je několika křivkami, případně pracovními body určeno, jak dlouho, jakým proudem a napětím současně smí být konkrétní tranzistor zatížen, případně jsou přímo specifikovány hodnoty kolektorového napětí a proudu, při kterých k sekundárnímu průrazu nesmí dojít.

Podobným příkladem nevhodnosti použití pro konkrétní aplikaci jsou levné spínací tranzistory MOSFET typu BUZ a IRF, použité jako koncové tranzistory v nf zesilovači. Technologie výroby těchto tranzistorů za posledních 15 let značně pokročila, tranzistory jsou specifikovány především jako spínací a pro tento režim je architektura jejich čipů optimalizována.

6. Jednotlivé mezní hodnoty zatížení

Největší přípustná teplota čipu, tepelný průraz

Teplota polovodičových přechodů nemůže být volena libovolně. Fyzikální mechanismy, které podmiňují činnost přechodu PN a z něj složených struktur, jsou tepelně závislé. Volné nosiče proudu, elektrony nebo díry, je možné generovat působením tepla. Zvyšujeme-li teplotu přechodu, zvětšuje se koncentrace tepelně generovaných nosičů proudu. Koncentrace takto vzniklých nosičů se se zvyšováním teploty blíží koncentraci nosičů, vyvolané vlivem nečistot. Při určité teplotě přechodu jsou obě tyto koncentrace tak blízké, že normální činnost PN přechodu ustává. Napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru se pak blíží nule a strukturou prochází proud, omezený jen velikostí zátěže. Tento mechanismus se označuje jako tepelný průraz přechodu. Podle příčiny vzniku /kolektorový nebo bázový obvod/ může nastat v celé ploše přechodu, nebo jen v jeho určitém místě.

Jeho přímým důsledkem je protavení materiálu přechodu a úplná destrukce tranzistoru.

Vysoká teplota vždy urychluje fyzikálně chemické pochody, které souhrnně označujeme jako stárnutí tranzistoru. Tyto pochody znehodnocují vlastnosti struktury v závislosti na čase a jsou tím pomalejší, čím je používaná teplota přechodu nižší. Pracovní teplota je tedy jedno z hlavních kritérií, které určují provozní spolehlivost tranzistoru. Stárnutí značně podléhá i pájený spoj mezi základnou a čipem tranzistoru. Při tepelném namáhání tranzistoru a velkých rozdílech teplot /zapínání a vypínání namáhaného zařízení/ dochází ke krystalizaci tohoto spoje, zvětšování vnitřního tepelného odporu, následnému dalšímu přehřívání čipu a neodvratnému tepelnému průrazu tranzistoru. Stárnutí, tzv. tepelnou únavu pájeného spoje mezi základnou a čipem tranzistoru bohužel nelze v amatérských podmínkách nijak měřit ani diagnostikovat. Částečný obraz o stavu či stáří dotýčeného tranzistoru lze získat srovnáním chování nového a použitého kusu na relativně specializovaném měřiči /např. TESLA BM455E/, který ale bohužel mnoho amatérů nevlastní.

Proto je nutno při amatérské aplikaci již používaných tranzistorů, o kterých nevíme, čím a jak dlouho byly zatěžovány, původní mezní hodnoty dosti značně snížit. Jen tak lze dosáhnout jakési minimální jistoty, že v daném zapojení tranzistor ještě nějaký čas vydrží.

Příklad: nové, nepoužívané tranzistory řady KD607/617 lze při rozumném chlazení využívat až do výkonu zesilovače cca 70W na zátěži 4Ω. Tytéž tranzistory, ale používané /např. demontované z nějakého zařízení/ ovšem takto zatěžovat rozhodně nelze, rozumné a účelné je snížit dosažitelný výstupní výkon do stejné zátěže o cca 30-40%, zesilovač vybavit spolehlivým jistěním a ochranou proti ss napětí na výstupu při případné havárii některého výkonového tranzistoru.

Maximální přípustné napětí U_{ceo}

Výrobce jej udává ve specifikaci /datasheetu/ příslušného typu tranzistoru. Jde o nejvyšší napětí, které je dovoleno přiložit mezi kolektor a emitor /báze nezapojena/, aniž by došlo k nevratnému poškození.

Jeho v praxi použitelná velikost je úzce spjata s křivkou SOA /safe operating area - bezpečná pracovní oblast/, která udává, jakým napětím a proudem současně lze tranzistor zatěžovat, aby pracoval v bezpečné části pracovní charakteristiky.

Napětí U_{ceo} rozhodně v praxi nesmí být překračováno, přestože většina typů dobrých tranzistorů známých výrobců má výrobní rezervu tohoto napětí až +80%. U některých typů tranzistorů tato rezerva ovšem může být např. jen 10% a to pro dobrou ochranu proti napěťovým špičkám a skokům rozhodně nestačí. Proto není radno využívat celé hodnoty dovoleného napětí U_{ceo} , nýbrž s ohledem na spolehlivost obvodu je nutno využívat pouze cca 80% z této dovolené hodnoty.

Příklad: použijeme-li ve výkonovém dvojčinném zesilovači třídy AB výkonové tranzistory s $U_{ceo}=100V$, pak maximální napájecí napětí naprázdno /bez buzení/ smí činit nejvýše 80V /2x40V při symetrickém napájení/, aby byla zachována dobrá spolehlivost a ochrana proti napěťovým špičkám jak ze strany napájení, tak ze strany zátěže. Při návrhu takového zesilovače je třeba samozřejmě vzít v úvahu také přípustné kolísání síťového napětí, aby ani při nejvyšší kladné toleranci síťového napětí /242V/ nebyly výkonové, ani jiné tranzistory v zesilovači napěťově přetíženy a zůstala zachována rezerva U_{ceo} 15-20% proti katalogovému údaji. Zesilovače s vynikající spolehlivostí využívají hodnotu U_{ceo} tranzistorů prakticky jen z 50-60%. Rovněž tak zesilovače, pracující do těžkých induktivních či komplexních zátěží /výstupní transformátor, složité reproduktorové výhybky apod./ by měly využívat U_{ceo} výkonových tranzistorů asi jen z 60% a navíc by měl být výstupní obvod vybaven rychlými ochrannými diodami, které omezí vznikající napěťové špičky a převedou je zpět do filtračních kondenzátorů zdroje – někdy se proto těmto ochranným diodám také říká rekuperační.

