

Aspekty měření šumu 1/f výkonových polovodičových prvků

J. Hájek¹, V. Papež¹

¹ Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze,
Technická 2, 166 27 Praha 6
E-mail: hajekj1@fel.cvut.cz, papez@fel.cvut.cz.

Anotace:

Jedním z hlavních znaků jakosti elektrotechnických součástek je úroveň proudového šumu. U pasivních prvků je šum přímo měřítkem kvality a stárnutím se může výrazně měnit. Měřením šumu tak lze předpovídat dobu života nebo pravděpodobnost poruchy. V případě polovodičů je proudový šum měřítkem kvality výroby či použité technologie. Na rozdíl od pasivních součástek není vliv stárnutí polovodičových prvků na šum tak výrazný. Šum však lze využít k detekci skrytých vad VA charakteristik, které se obtížně zjišťují běžnými měřeními. Na rozdíl od měření elektrických parametrů vyžaduje měření šumu dokonalé přizpůsobení měřicího obvodu k měřené součástce. Použité přístroje a zapojení výrazně ovlivňují výsledek měření.

Annotation:

Flicker noise is one of the most important quality indicators of electronic devices. Quality of passive elements is often evaluated according noise level which is deeply affected by material ageing. Noise measurement can be used for lifetime prediction and probability of failures. Concerning semiconductor devices flicker noise is a criterion of used production technology. Influence of ageing is (contrary of passive devices) not so expressive. However, noise measurement allows to reveal latent defects of diode reverse properties that are unidentified by means of standard in-process inspection. Unlike other methods noise measurement requires perfect matching of analyzing circuit and investigated device. Used equipment and method deeply affect results of measurement.

ÚVOD

Šum je náhodný neperiodický signál generovaný obecně náhodným procesem. U pasivních i aktivních součástek rozeznáváme dva základní druhy šumu: tepelný a proudový. Nejvíce popsáným šumem je proudový šum aktivních polovodičových součástek malého výkonu. Výzkum je především veden potřebou zpracovávat malé signály při co nejnižším napájecím napětí. Odstup užitečného signálu od šumu součástky je tak kritickým parametrem pro aplikace.

Tepelný šum

V případě tepelného šumu hovoříme o náhodném proudu s nulovou střední hodnotou, ale s nenulovým výkonem. Jeho příčinou je tepelný pohyb elektronů s fluktuacemi náboje v řádu 10^{-12} s. Lze odvodit, že spektrum tepelného šumu je v oblasti do cca 100 GHz spojitě a konstantní, pak klesá k nule. Integrál spektrální hustoty výkonu totiž musí být konečné číslo. Úroveň tepelného šumu závisí pouze na absolutní teplotě součástky (T) a na šířce pásma (B), ve kterém šum vyšetřujeme. Jednoznačně je šumový výkon P_N dán vztahem

$$P_N = kTB, \quad (1)$$

kde k je Boltzmannova konstanta $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K. Často užívanou jednotkou šumového výkonu je právě kTB mající rozměr watt. Z hlediska diagnostiky součástek není tepelný šum zajímavý, neboť je vždy přítomný a je ovlivněn pouze teplotou [1]. Dále se jím proto nebudeme zabývat.

Proudový šum

Hlavní příčinou vzniku tzv. proudového šumu jsou nehomogenity v materiálu generující velmi rychlé a náhodné změny protékajícího proudu. Tyto skokové změny se ve spektru šumu projeví jako klesající průběh výkonové hustoty od zlomků Hz až do jednotek kHz. Úroveň šumového napětí vztažená na jeden hertz šířka pásma je

$$U_N^2(f) = C R^\alpha I^\beta f^{-1}, \quad (2)$$

kde C je konstanta a exponenty α , β charakterizují danou součástkou (obvykle $\alpha = \beta = 2$). Měřenou součástkou (odporem R) protéká stejnosměrný proud I . U polovodičových prvků je popsáno více druhů šumu podle způsobu jejich generace [2]. Pro diagnostiku polovodičových prvků je však nejdůležitější šum 1/f (tzv. flicker noise). Ten je spojen se záchytem volných nosičů náboje na hladinách uvnitř zakázaného pásu. Přítomnost hladin (pastí) je výrazně ovlivněna jevy na povrchu polovodičového substrátu, především plazivými proudy. Podmínkou pro vznik proudového šumu je vždy polarizace součástky.

MĚŘENÍ ŠUMU

Na rozdíl od aktivních elektronických součástek nemá smysl u výkonových polovodičů měřit šumové číslo, protože tyto prvky neslouží k přenosu signálu. Smysl má měřit úroveň šumu 1/f. Nutnými předpoklady jsou vhodná polarizace součástky,

oddělení šumové složky od stejnosměrné polarizace, impedanční přizpůsobení vyhodnocovacího analyzátoru a volba vhodného kmitočtového rozsahu vzhledem k povaze šumu $1/f$.

Polarizace součástky

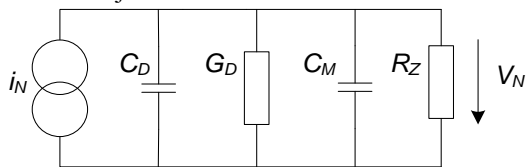
Výkonové prvky vykazují při závěrné polarizaci vysokou impedanci (10^2 až 10^3 M Ω), a proto je nutné použít polarizační zdroj o dostatečně vysokém napětí. Proudový šum je v obecném kmitočtovém pásmu $B = f_2 - f_1$ roven:

$$U_N = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} K R^2 I^2 f^{-1} df} = \sqrt{K U^2 \ln \frac{f_1}{f_2}} = K' U, \quad (3)$$

a je tedy úměrný stejnosměrné polarizaci. Aby měřeným prvkem protékal proud v řádu alespoň jednotek či desítek nA, dosahuje potřebné polarizační napětí hodnot řádově 10^2 V. Polarizace musí být stejnosměrná bez střídavé složky. Zdroj napětí by měl být bezšumový a s minimálním vnitřním odporem, aby vykazoval minimální tepelný šum. Ideálním zdrojem jsou galvanické články. Vhodné je sériové spojení obyčejných baterií 4,5 V nebo baterií 6F22 (9 V). Ty však mají díky menší ploše elektrod vyšší vnitřní odpor a tedy vyšší šum. Regulace polarizačního napětí je možná pouze změnou počtu článků, což většinou nevede.

Náhradní obvod

Z hlediska generovaného šumového signálu se měřený prvek (DUT) chová jako zdroj proudu i_N , který je přemostěn kapacitou pn přechodu C_D a velmi malou vodivostí G_D . Kapacita přechodu je napěťově závislá ($C_D \approx U^{-1/2}$) a podle průměru součástky a velikosti závěrného napětí se pohybuje v řádu desítek až stovek pF. Například křemíkové diody o průměru 5 mm pro usměrňovací sloupce se závěrným napětím 2 kV mají kapacitu 20-30 pF při polarizaci 100 V. Zdroj šumového proudu i_N má svůj vnitřní odpor, ten však nelze nijak určit.



Obr. 1: Náhradní zapojení DUT a vyhodnocovací části

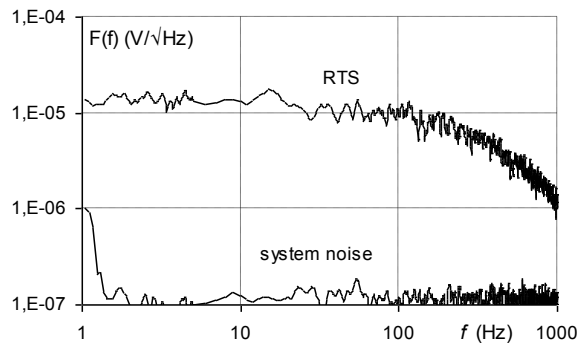
Vodivost G_D je teplotně závislá, což je dáno závislostí závěrné volt-ampérové charakteristiky na teplotě. Při vyšší teplotě narůstá exponenciálně závěrný proud tekoucí součástkou, a tedy i proudový šum. Potom je však obtížné oddělit šum $1/f$ a nezajímavý generačně-rekombinační šum. Ohřev lze provádět např. ponořením do silikonového oleje. Měřený prvek je připojen k

vyhodnocovacímu obvodu (obrázek 1), který lze nahradit paralelní kombinací vstupního odporu R_Z a kapacity C_M .

Volba kmitočtového rozsahu

Z hlediska kmitočtového spektra šum generovaný pn přechodem odpovídá bílému šumu, který je filtrován dolní propustí RC prvního řádu. Ve spektru existuje mezní (cut-off) kmitočet f_c , pod kterým má spektrální funkce $F_1(f)$ konstantní hodnotu, nad ním má průběh tvar $1/f$. Příklad reálné spektrální funkce šumu naměřené na pn přechodu výkonové součástky je zobrazen na obrázku 2.

Pro optimalizaci měření je třeba určit kmitočtovou oblast, kde bude signál vyhodnocován. Měření je třeba provádět tam, kde je nejvyšší poměr S/N. V oblasti, kde jsou úrovně spektrální výkonové hustoty signálu a šumu konstantní, je též dosažitelný poměr S/N konstantní a nezávislý na kmitočtech. Z hlediska měření je vhodné volit šířku kmitočtové oblasti maximální. Pak je maximální i výkon zpracovávaného signálu. Spodní hranici volíme na kmitočtech, kde se již neuplatňuje zvýšený šum měřicího zařízení a vzrůstá dosažitelný poměr S/N. Vyhýbáme se měření v oblasti nejnižších kmitočtů (< 10 Hz), kde je signál zkreslován nelinearitami měřicího zařízení a kde by měření trvalo velmi dlouho. Horní hranici volíme v té oblasti, kde dochází k poklesu úrovně měřeného signálu a klesá tak i dosažitelný poměr S/N.



Obr. 2: Spektrum proudového šumu a vlastního šumu měřicího zařízení

Přizpůsobení je vhodné řešit tak, aby k analyzátoru byl přiváděn maximální šumový výkon generovaný DUT v celé kmitočtové oblasti, kde je měření prováděno. Vzhledem k náhradnímu schématu DUT na obrázku 1 je výhodné volit vstupní odpor R_Z připojeného měřiče výkonu velmi vysoký. Toto zjednodušení ale platí pouze tehdy, pokud dolní RC propust tvořená kapacitami v měřicím obvodu a zatěžovacím odporem a vodivostí DUT bude mít mezní kmitočet:

$$f_m = \frac{G_D + 1/R_Z}{2\pi(C_D + C_M)} \quad (4)$$

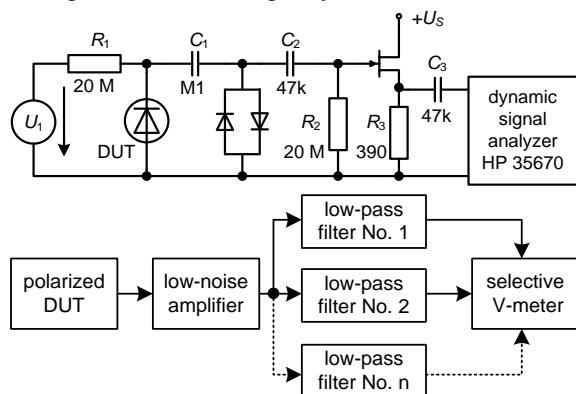
vyšší než je nejvyšší kmitočet, na kterém je signál zpracováván. V opačném případě je vhodná taková hodnota R_z , pro kterou přibližně platí $f_m = f_c$.

Princip měření

Měřený prvek je polarizován stejnosměrným zdrojem napětí U_1 s předřadným odporem R_1 . Tento odpor zabraňuje zkratování šumového proudu i_N přes napěťový zdroj U_1 , který se pro šumový signál chová jako zkrat. Odpor R_1 musí být bezšumový a jeho hodnota srovnatelná s impedancí DUT. Galvanické oddělení zdroje polarizace a vyhodnocovacího obvodu zajišťuje kapacita C_1 , přes kterou nesmí téci stejnosměrný proud. RC článek složený z C_1 , C_2 , R_2 pracuje jako horní propust' a určuje nejnižší kmitočet, kde lze měřit šum. Pro hodnoty z obrázku 3 tak lze měřit již od zhruba 0,5 Hz. Naproti tomu kapacita měřeného pn přechodu (C_D) a paralelně řazené odpory R_1 , R_2 tvoří dolní propust' s mezním kmitočtem asi 1,5 kHz. Šum na vyšším kmitočtu tak nebude možné pozorovat.

Jako přizpůsobovací obvod mezi DUT a spektrálním analyzátozem je použit nízkošumový lineární zesilovač s vysokým vstupním odporem. Zapojení „source follower“ je osazeno tranzistorem J-FET J 310. Vstupní odpor zesilovače je 10 M Ω , napěťové zesílení je velmi blízké 1 a šumové číslo je 4 až 6 dB. S kapacitou měřeného čipu kolem 30 pF je mezní kmitočet f_m přibližně 400 Hz a zhruba odpovídá cut-off kmitočtu měřeného signálu.

Pro měření a statistické vyhodnocení šumového napětí je použit Dynamic Signal Analyzer HP 35670. Pro maximální výkonové přizpůsobení je vhodné volit analyzátor s co nejvyšším vstupním odporem. V praxi však téměř neexistují (kromě elektronkových parametrických zesilovačů) analyzátoři s vyšším vstupním odporem než 1 M Ω . Stejnoseměrné oddělení analyzátoru a zesilovače zajišťuje kapacita C_3 . Diodové ochrany chrání analyzátor před impulzním přepětím, které by mohlo pronikat z polarizovaného DUT přes oddělovací kapacitu.



Obr. 3: Obvodové a blokové schéma měřicího zařízení

Popsaná metoda předpokládá vyhodnocení šumového signálu při použití dynamického signálního analyzátoru. Signál však může být zpracováván i analogově. Přivedeme-li výstup zesilovače paralelně

k sadě pasivních filtrů, můžeme na jejich výstupech vyhodnocovat šum pomocí selektivního voltmetru nebo osciloskopu. Zapojení umožňuje odlišit proudový šum měřené výkonové součástky od vnějších rušivých signálů. Impulzní rušivé signály u analogové metody nezpůsobí výrazné zkresení měřeného signálu. Analogová zobrazovací a vyhodnocovací jednotka má daleko větší dynamický rozsah než jednotka číslicová.

Kromě obvodového řešení ovlivňuje měření mnoho faktorů. Nutné je kvalitní stínění všech částí zpracovávajících nízkoúrovňové signály. Zdroje stejnosměrného napětí (polarizace DUT, napájení zesilovače) musí být bez střídavé složky, pozor je nutné dát především na kmitočet 50 Hz a jeho násobky. Nepříjemný vliv na závěrný proud tekoucí skrz DUT může mít vnější osvětlení. V důsledku vnitřního fotoefektu lze na nezatemněném osvětleném čipu objevit výrazné falešné signály v okolí kmitočtu 100 Hz a jeho násobků.

ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá praktickými aspekty měření proudového šumu výkonových polovodičových prvků. Popisované měřicí metody jsou využitelné především při výrobě a mezioperační kontrole nebo při posuzování kvality a diagnostice výkonových prvků. Měření proudového šumu je oproti ostatním diagnostickým metodám nedestruktivní a probíhá při bezpečném přiloženém napětí. Metody popsané v článku byly využity při výzkumu nestabilit závěrných volt-ampérových charakteristik výkonových diod [3]. Vznik článku byl podpořen z výzkumného záměru MSM 6840770017 Rozvoj, bezpečnost a spolehlivost elektrotechnických zařízení.

LITERATURA

- [1] Papež V., *Technologie elektronických součástek*. Praha: ČVUT – ediční středisko, 1992, 184 s.
- [2] Blasquez G., "General aspects of noise phenomena", in *Instabilities in silicon devices*, pp. 363–390, Elsevier Science Publishers, 1986.
- [3] Hájek J., Kojecký B., Papež V., "Investigation of Flicker Noise in Silicon Diodes under Reverse Bias," in *ISPS '10 Conference Proceedings*, (Prague), pp. 147–152, IET, 2010.