

Měření průběhu napětí U_{DS} tranzistorů na bázi nitridu gallia ve výkonových obvodech měničů

Radek Novák

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

radekn@kev.zcu.cz

Measuring the Drain-to-Source Voltage of Transistors Based on Nitride Gallium in Power Converter Circuits

Abstract – The article is about selecting a suitable voltage oscilloscopic probe for measuring the drain-to-source voltage of GaN E-HEMT (Enhancement – High Electron Mobility Transistor) power transistors mounted in power converter circuits. Successful measuring depends on knowing the parameters of the transistor, the power circuit and the gate circuit. Because of the voltage in the power circuit (up to 600 V) our selection is restricted to high-voltage passive probes. GaN E-HEMT transistors with fast switching (lasting several ns) and the response time of the measuring system must correspond to this. The uncertainty of measuring is discussed in the conclusion of the article.

Keywords – Nitride gallium; High Electron Mobility Transistor; Rise time; Fall time.

I. ÚVOD

Tranzistory E-HEMT (tranzistor s vysokou pohyblivostí elektronů, obohacovací typ) na bázi GaN patří mezi moderní polovodičové součástky. Ve srovnání s křemíkovými tranzistory (MOSFET) dosahují řádově lepších parametrů, umožňují vysoké frekvence spínání a konstrukci měničů s vysokou účinností. Krátké spínací a vypínací doby tranzistoru vyžadují, při měření napětí U_{DS} (drain-source), použití měřicího systému s odpovídající odezvou. Osciloskopická sonda musí být také schopná pracovat s napětím větším než 600 V.

II. VÝBĚR OSCILOSKOPICKÉ SONDY

Sepnutí a vypnutí tranzistoru GaN E-HEMT není okamžité a neprobíhá bezproudově. Důvodem je nabíjení vnitřních kapacit. Patří mezi ně: vstupní kapacita C_{ISS} , výstupní kapacita C_{OSS} a zpětnovazební kapacita C_{RSS} . Vstupní kapacita je rovna součtu kapacit C_{GS} (gate-source) a C_{GD} (gate-drain), výstupní součtu C_{DS} (drain-source) a C_{GD} (gate-drain). Zpětnovazební kapacita C_{RSS} odpovídá Millerově kapacitě C_{GD} . Katalogové hodnoty kapacit tranzistoru GS66508B (výrobce GaN Systems) uvádí tabulka I.

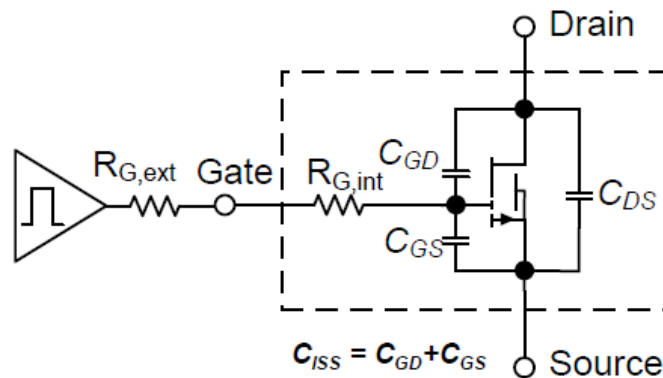
Čas potřebný pro sepnutí nebo vypnutí tranzistoru také závisí na vnitřním sériovém odporu řídicí elektrody R_G a výstupním odporu budícího obvodu. Z toho vyplývá možnost prodloužení spínacích a vypínacích dob pomocí externího odporu hradla $R_{G(ext)}$. Náhradní schéma tranzistoru E-HEMT ilustruje obrázek I.

TABULKA I. KATALOGOVÉ HODNOTY KAPACIT TRANZISTORU GS66508B [1]

Parametr	Typická hodnota	Podmínky
Vstupní kapacita C_{ISS}	260 pF	$U_{DS} = 400 \text{ V}$ $U_{GS} = 0 \text{ V}$ $f = 1 \text{ MHz}$
Výstupní kapacita C_{OSS}	65 pF	
Zpětnovazební kapacita C_{RSS}	2 pF	

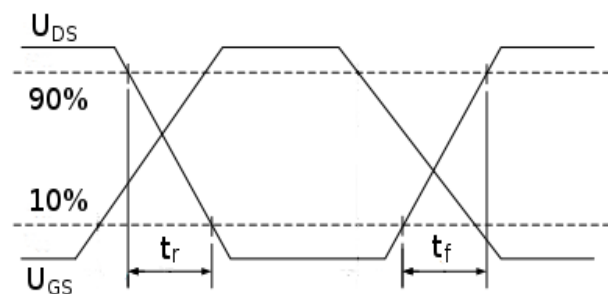
Doba náběhu a doběhu napětí, při spínání a vypínání tranzistoru, je měřena mezi 10 % a 90 % úrovně ustálené hodnoty (Obrázek II.). Měření průběhu napětí U_{DS} provádíme pomocí digitálního osciloskopu s připojenou napěťovou sondou. Při výběru měřicího systému musíme počítat s následujícími parametry v obvodu:

- napětí U_{DS} může dosahovat hodnoty až 600 V;
- strmost du/dt je větší než 100 V/ns;
- doba náběhu a doběhu je rovna několika jednotkám ns;
- spínací frekvence je větší než 10 MHz.



Obrázek I. Náhradní schéma tranzistoru E-HEMT [2]

Napětí v obvodu náš výběr omezuje na vysokonapěťové pasivní sondy. Pro úspěšnou rekonstrukci signálu potřebujeme vzorkovat přinejmenším dvojnásobkem mezní frekvence (Nyquistovo kritérium). Přitom musíme vzít v úvahu, že kritérium platí pro periodické sinusové signály. Pokud vzorkujeme nesinusové signály, vycházíme z jejich rozkladu na Furierovu řadu. Počet členů řady je nekonečný, ale ve skutečnosti jej omezujeme. Uvažujeme-li až s jedenáctou harmonickou, vznikne přijatelné zobrazení se strmými čely a jen mírně zvlňnými temeny [3]. Pro příklad uvažujme spínací frekvenci 10 MHz, jedenáctá harmonická odpovídá hodnotě 110 MHz. Po aplikaci Nyquistova kritéria vychází minimální vzorkovací frekvence 220 MHz.



Obrázek II. Doba náběhu a doběhu napětí U_{DS} [2]

Při měření ideálního obdélníkového signálu (doba náběhu a doběhu se rovná nule) je na stínítku osciloskopu zobrazen signál s nenulovou vzestupnou dobou t_{re} . Tuto dobu lze vyjádřit přibližným vztahem [3]:

$$t_{re} = \frac{0,35}{f_g} \quad (1)$$

kde: f_g je mezní frekvence osciloskopu.

Vzestupná doba osciloskopu se zvětší o vzestupnou dobu sondy a signálu. Výslednou (zobrazenou) dobu lze vyjádřit vztahem [3]:

$$t_{rcelk} = \sqrt{t_{re}^2 + t_{rs}^2 + t_{ri}^2} = \sqrt{t_{rms}^2 + t_{ri}^2} \quad (2)$$

kde: t_{rcelk} - je celková vzestupná doba; t_{re} - odezva osciloskopu; t_{rs} - odezva sondy; t_{ri} - vzestupná doba čela impulzu; t_{rms} - odezva měřicího systému.

Odezva měřicího systému (sondy s osciloskopem) musí být značně menší než vzestupná doba čela měřeného impulzu. Pokud tento požadavek nedodržíme, prováděný experiment znehodnotíme velkou nejistotou (chybou) měření. Absolutní chybu, měření doby náběhu napětí, lze určit z následujícího vztahu:

$$\Delta = |A - X| = \sqrt{t_{ri}^2 + t_{rms}^2} - t_{ri} \quad (3)$$

kde: A - je naměřená hodnota; X - konvenčně pravá hodnota; t_{rms} - odezva měřicího systému; t_{ri} - vzestupná doba čela impulzu.

O vhodnosti použití měřicího systému, pro měření doby náběhu a doběhu napětí U_{DS} , nám více vypoví relativní chyba δ . Obvykle ji vyjadřujeme v procentech a je rovna poměru absolutní chyby Δ ke konvenčně pravé hodnotě X :

$$\delta = \frac{\Delta}{|X|} * 100 = \frac{\sqrt{t_{ri}^2 + t_{rms}^2} - t_{ri}}{t_{ri}} * 100 = \left(\sqrt{\left(\frac{t_{rms}}{t_{ri}} \right)^2 + 1} - 1 \right) * 100 \quad (4)$$

kde: Δ - je absolutní chyba; X - konvenčně pravá hodnota; t_{rms} - odezva měřicího systému; t_{ri} - vzestupná doba čela impulzu.

Tabulka II. ilustruje relativní chybu měření vzestupné doby čela impulzu vlivem odezvy měřicího systému. Chceme-li měřit s danou relativní chybou měření, způsobenou odezvou systému, vypočítáme maximální dobu odezvy měřicího systému úpravou vztahu 4:

$$t_{rms} = t_{ri} \sqrt{\left(\frac{\delta}{100} + 1 \right)^2 - 1} \quad (5)$$

Máme-li požadavek měření náběžné hrany s dobou trvání 3,5 ns (10 % až 90 % ustálené hodnoty) a vyžadujeme měřit s relativní chybou $\delta = 5$ %, použijeme měřicí systém s dobou odezvy maximálně 1,12 ns. Při použití osciloskopu a sondy s mezní frekvencí 500 MHz (doba odezvy 700 ps, vypočteno dle vztahu 1), získáme měřicí systém s odezvou:

$$t_{rms} = \sqrt{t_{re}^2 + t_{rs}^2} = \sqrt{2 * (700 * 10^{-12})^2} = 990 ps \quad (6)$$

kde: t_{rms} – odezva měřicího systému; t_{re} - odezva osciloskopu; t_{rs} – odezva sondy.

TABULKA II. CHYBY VLIVEM ODEZVY MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Vzestupná doba čela impulzu t_{ri}	Chyba vlivem odezvy měřicího systému [%]							
	t_{rms} 1 ns	t_{rms} 0,9 ns	t_{rms} 0,8 ns	t_{rms} 0,7 ns	t_{rms} 0,6 ns	t_{rms} 0,5 ns	t_{rms} 0,4 ns	t_{rms} 0,3 ns
1 ns	41,42	34,54	28,06	22,07	16,62	11,8	7,7	4,4
2 ns	11,8	9,66	7,7	5,95	4,4	3,08	1,98	1,12
3 ns	5,41	4,4	3,49	2,69	1,98	1,38	0,88	0,5
4 ns	3,08	2,5	1,98	1,52	1,12	0,78	0,5	0,28
5 ns	1,98	1,61	1,27	0,98	0,72	0,5	0,32	0,18
6 ns	1,38	1,12	0,88	0,68	0,5	0,35	0,22	0,12

III. ZÁVĚR

K měření v silových obvodech měničů s tranzistory GaN E-HEMT je možné použít vysokonapětovou pasivní sondu s minimální šířkou kmitočtového pásma 500 MHz, například TPP0850 (výrobce Tektronix). Šířka kmitočtového pásma této sondy je 800 MHz, odezva (rise time) typicky <525 ps, vstupní impedance 40 M Ω / 1,8 pF, vstupní napětí 2500 V_{Peak}, 1000 V_{RMS} CAT II. Sonda zeslabuje signál 50x a je navržena pro sérii osciloskopů MSO/DPO5000 a MSO/DPO4000B.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-002: Moderní metody řešení, návrh a aplikace elektronických a komunikačních systémů.

LITERATURA

- [1] GaN SYSTEMS. *GS66508B: Bottom-side cooled 650 V E-mode GaN tranzistor: Preliminary Datasheet*. [online]. Rev 170818. [cit. 10.9.2017]. Dostupné z: <http://www.gansystems.com/gs66508b.php>
- [2] GaN SYSTEMS. *GN001 Application Guide: Design with GaN Enhancement mode HEMT*. [online]. Říjen 2016. [cit. 10.9.2017]. Dostupné z: http://www.gansystems.com/_uploads/whitepapers/91096_GaNSystems__GN001_Design_with_GaN_EHEMT_Rev3_20161007.pdf?pdf=GN001%20Application%20Guide%20-%20Design%20with%20GaN%20Enhancement%20mode%20HEMT
- [3] MATTHES, Wolfgang. *Hledání a odstraňování poruch – Měření a testování v počítačové a číslicové technice*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2001. 591 s. ISBN 80-86167-18-6.