

## Měření a simulace odolnosti varistorů standardními a nestandardními testy

Z Kubík, J. Skála

Katedra aplikované elektrotechniky a telekomunikací, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : zdekubik@kae.zcu.cz, skalaj@kae.zcu.cz

### Anotace:

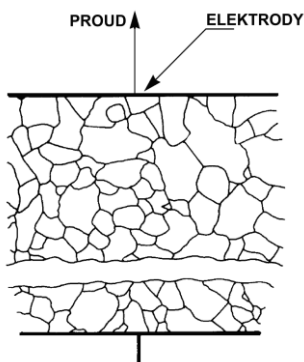
Článek se zabývá měřením a počítačovými simulacemi standardních i nestandardních testů varistorů, které se používají jako prvek v přepětových ochranách. V úvodu článku jsou uvedeny základní elektrické parametry varistorů, dále seznámení se standardy týkajícími se testování přepětových ochranných. V další části článku jsou provedena měření dle daných standardů. Nestandardní testy byly provedeny na generátoru velmi vysokého napětí. Pro všechna měření byly provedeny počítačové simulace v programu PSpice.

### Abstract:

This paper deals with measurement and computer simulation of varistors tests, that are used like surge protectors. At the beginning basic characteristics parameters of varistors are described. The next section of paper introduces surge protectors standards. According to these standards measurements of varistor were realized. Nonstandardized tests use a very high voltage generator. All measurements were verified by PSpice simulation.

## I. PARAMETRY VARISTORŮ

Varistor (název složený ze slov Variable Resistor) je součástka sloužící k ochraně elektronických zařízení před rychlými transientními vysokonapěťovými ději a jinými přepětími, které se mohou vyskytnout jak na napájecích vodičích, tak na datových či jiných vstupních vodičích zařízení. Varistor je polovodičová součástka, která je vyráběna z oxidu zinečnatého (ZnO) nebo z karbidu křemičitého (SiC). Struktura je tvořena malými granulami polovodičového materiálu (Obr. 1), které jsou spékány do potřebného rozměru a tvaru.



Obr. 1: Struktura varistoru

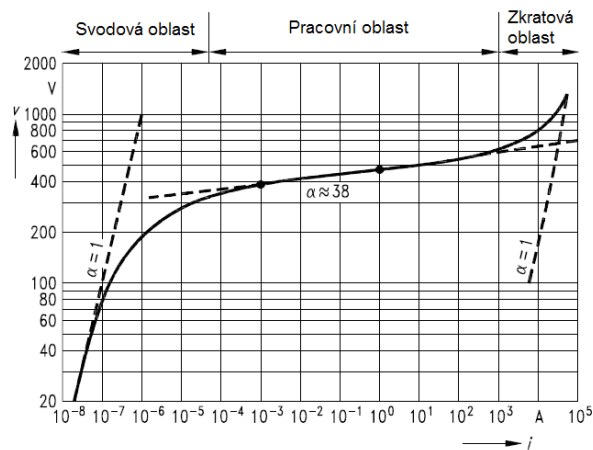
VA charakteristika varistoru je symetrická (Obr. 2.) a můžeme ji popsat rovnicí:

$$I = k \cdot U^\alpha \tag{1}$$

kde I je proud protékající varistorem, k je konstanta závislá na typu varistoru, U je napětí na varistoru a  $\alpha$

představuje stupeň nelinearity vodivosti varistoru (viz Obr. 2) [1].

Hodnota parametru  $\alpha$  pro ZnO varistory se pohybuje v rozmezí 25 až 40, pro SiC varistory pak v rozmezí 3 až 7.



Obr. 2: VA charakteristika varistoru SIOV-B60K250, I > 0

VA charakteristiku můžeme rozdělit do tří částí, jak je ukázáno na obr. 2. První oblast je nazývána svodová, v této části charakteristiky se varistor chová jako lineární rezistor o velmi vysoké hodnotě ( $\sim 10^9 \Omega$ ) a odpovídá zavřenému varistoru, kdy se chová jako rozpojený obvod. Druhou částí VA charakteristiky je pracovní oblast, která odpovídá vztahu (1), zde se varistor chová jako proměnný rezistor, jehož hodnota se snižuje. Po snížení na hodnoty jednotek ohmů se dostáváme do zkratové oblasti, která představuje sepnutý stav, při kterém

dochází k omezení přepětí na danou hodnotu, tzv. spínací varistorové napětí.

Základní parametry varistoru jsou:

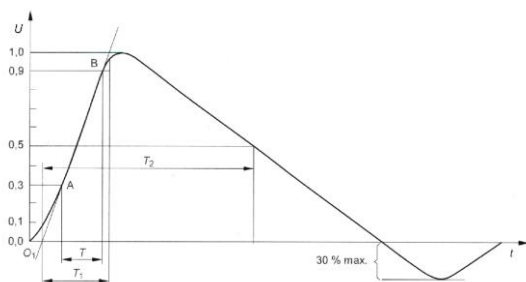
- *maximální trvalé pracovní napětí* – je to maximální napětí, které může být připojeno trvale na elektrody varistoru;
- *varistorové napětí* – je napětí na elektrodách varistoru, pokud jím protéká proud 1mA;
- *maximální spínací napětí* – je napětí, které je na elektrodách varistoru při použití proudové vlny;
- *maximální neopakovatelný proud* – je proud definovaný proudovou vlnou 8/20μs;
- *absorbovaná energie* – je dána vztahem:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u(t) \cdot i(t) dt \quad (2)$$

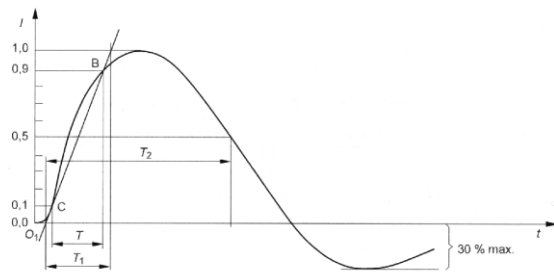
kde  $u$  je napětí na varistoru,  $i$  je proud varistorem. Při měření absorbované energie se využívá standardizovaná kombinovaná vlna 1.2/50μs + 8/20μs nebo kombinovaná vlna 10/700μs + 5/320μs.

## MĚŘENÍ PŘEPĚŤOVÝCH OCHRAN - STANDARDY

Standardní testy pro přepětové ochrany třídy III dle normy ČSN EN 61634-11: Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 11: Přepětivá ochranná zařízení zapojená v sítích nízkého napětí - Požadavky a zkoušky [2], do které řadíme varistory, popisuje norma ČSN EN 61000-4-5: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-5: Zkušební a měřicí technika - Rázový impuls - Zkouška odolnosti [3]. Tato norma definuje tvar kombinované vlny zkušební generátoru podle mezinárodní normy IEC 60060-1. Kombinovaná vlna se skládá z napětové vlny pro rozpojený obvod, označovaná jako 1.2/50μs (Obr. 3) a z proudové vlny pro zkratovaný obvod, označovaná jako 8/20μs (Obr.4).



Obr. 3: Definice napětové vlny



Obr. 4: Definice proudové vlny

Napětovou vlnu pro rozpojený obvod můžeme popsat rovnicemi:

$$T_1 = 1.67 \times T = 1.2 \mu s \pm 30\% \quad (3)$$

$$T_2 = 50 \mu s \pm 20\% \quad (4)$$

Proudovou vlnu pro zkratovaný obvod můžeme popsat rovnicemi:

$$T_1 = 1.25 \times T = 8 \mu s \pm 30\% \quad (5)$$

$$T_2 = 20 \mu s \pm 20\% \quad (6)$$

Vztah mezi špičkovým napětím a špičkovým proudem je dán dle Tabulky 1. Efektivní impedance generátoru je dána normou a odpovídá hodnotě  $2\Omega \pm 10\%$ .

Tab. 1: Vztah mezi napětím a proudem generátoru

Špičkové napětí $\pm 10\%$	Špičkový proud $\pm 10\%$
0.5 kV	0.25 kA
1 kV	0.5 kA
2 kV	1 kA
4 kV	2 kA

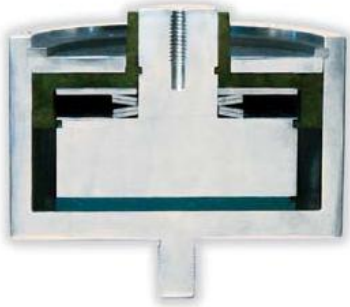
## PARAMETRY TESTOVANÉHO VARISTORU

Varistory Strikesorb (Obr. 5) jsou umístěny v robustním kovovém pouzdře, které zaručuje velmi dobrý přenos tepla mezi polovodičovou kapslí varistoru a okolním prostředím.



Obr. 5: Varistor Strikesorb 40-B

Toto uspořádání (Obr. 6) má i velmi pozitivní vliv na rozložení proudových silochar v polovodičovém materiálu, kde proudová hustota je rozložena po celé ploše polovodiče, není zde náchylnost k velkému bodovému proudovému namáhání, jako u konvenčních varistorů. Tyto parametry předurčují použití varistoru Strikesorb na místech, kde je zapotřebí dlouhodobá bezpečná ochrana před případným přepětím.



Obr. 6: Vnitřní uspořádání varistorů Strikesorb

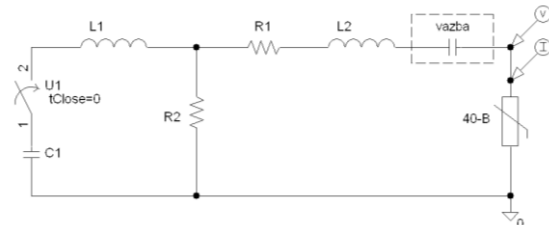
Katalogové údaje varistoru 40-B jsou:

- nominální provozní napětí  $V_n = 240V$ ,
- maximální trvalé provozní napětí = 300V,
- varistorové napětí (při proudu 5mA) stejnosměrné / střídavé = 526V / 506V,
- svodový proud (při  $V_n$ ) = 400 $\mu$ A,
- maximální spínací napětí = 1200V,
- maximální proud = 140kA (pro proudovou vlnu 8/20 $\mu$ s), 7.5kA (pro proud. vlnu 10/350 $\mu$ s),
- provozní teplota = -40 až +85°C. [4]

Pro tyto parametry byl navržen počítačový model, s kterým byly provedeny simulace.

## STANDARDNÍ TESTY VARISTORU

Pro standardní testování varistoru Strikesorb 40-B byl použit generátor kombinované vlny (surge generátor) EMTesT VCS500. Náhradní elektrické schéma tohoto generátoru je uvedeno na obr. 7.



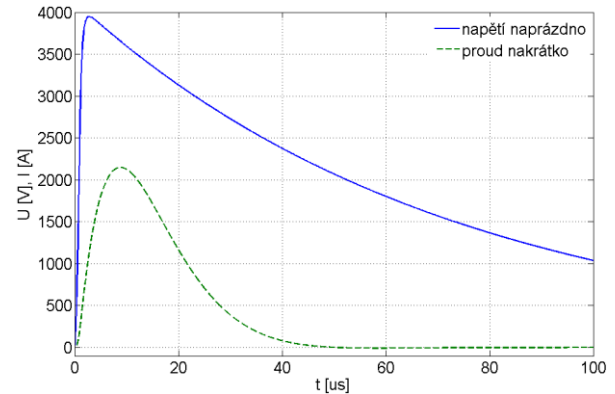
Obr. 7: Náhradní schéma generátoru

Toto schéma bylo také použito pro počítačové simulace měření, provedené programem OrCAD PSpice. Rezistor  $R_L$  není součástí generátoru, sloužil jako zakončovací impedance při simulaci. Pro simulaci napěťové vlny byla hodnota rezistoru  $R_L$  zvolena 10M $\Omega$  (představuje rozpojený obvod) a pro simulaci proudové vlny byla hodnota  $R_L$  zvolena

1m $\Omega$  (zkratovaný výstup obvodu). Výsledky simulace generátoru kombinované vlny jsou zobrazeny na Obr. 8.

Norma ČSN EN 61000-4-5 definuje pro připojení několik vazeb, které definují impedanci mezi zkušebním generátorem a testovaným zařízením (Obr. 7). V našem případě byly použity dvě vazby:

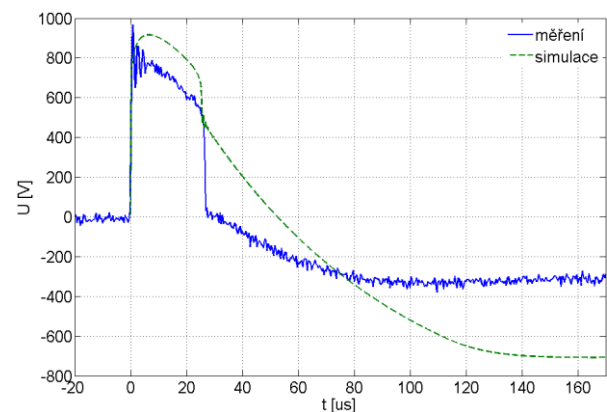
- 9 $\mu$ F + 10 $\Omega$ , pokud je přepětěová ochrana připojena mezi vodiči L (nebo N) a PE,
- 18 $\mu$ F, pokud je přepětěová ochrana připojena mezi vodiči L a N.



Obr. 8: Simulace kombinované vlny

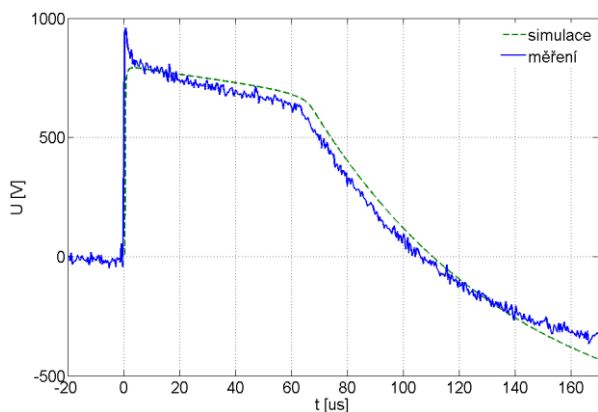
Pro všechna měření a simulace byla použita vlna generátoru o špičkovém napětí 4kV, čemuž odpovídá špičkový proud 2kA (viz Tab. 1). Použitý generátor EMTesT VCS500 již obsahuje zmíněné vazební impedance, jaká bude použita závisí na konkrétním připojení měřeného objektu.

Na Obr. 10 jsou vyobrazeny průběhy napětí na varistoru. Spínací napětí varistoru při měření bylo 967,7V, tato hodnota je zakreslena zákmitý, které se při měření vyskytly díky parazitním vlastnostem propojovacích vodičů (parazitní indukčnosti) mezi generátorem a varistorem. Simulované spínací napětí je rovno 922,7V. Průběh simulovaného napětí se mírně liší od průběhu měřeného napětí, což je pravděpodobně způsobeno použitím idealizovaných parametrů ostatních součástek modelu. Při tomto měření nebyly zaznamenány časové průběhy proudu, byl pouze změřen špičkový proud. Ten byl roven 1660A při měření, 1547A při simulaci.

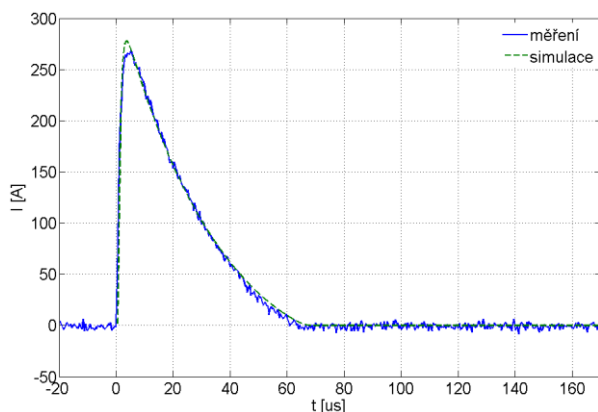


Obr. 9: Průběhy napětí na varistoru, vazba 18 $\mu$ F

Další měření byla provedena se zapojením varistoru přes vazební impedanci  $9\mu\text{F} + 10\Omega$ . Naměřené průběhy napětí na varistoru ukazuje Obr. 10, průběhy proudu varistorem pak Obr. 11. I zde je patrný překmit napětí při měření, opět způsobený parazitními indukčnostmi přívodních vodičů. V tomto případě bylo spínací napětí  $1017\text{V}$  při měření a  $792,6\text{V}$  při simulaci. Špičkový proud varistorem byl změřen  $277,5\text{A}$ , simulovaný poté  $274,1\text{A}$ . V tomto případě se simulované průběhy velmi blíží měřeným průběhům.



Obr. 10: Průběhy napětí na varistoru, vazba  $9\mu\text{F} + 10\Omega$



Obr. 11: Průběhy proudu varistorem, vazba  $9\mu\text{F} + 10\Omega$

## NESTANDARDNÍ TESTY VARISTORU

Nestandardní testy varistoru byly prováděny ve vysokonapěťové laboratoři za použití vysokonapěťového generátoru (Marxův generátor). Výstupní napěťová vlna odpovídá normované vlně  $1.2/50\mu\text{s}$ , špičkové napětí je možné dle konfigurace zapojení jednotlivých stupňů generátoru měnit. V případě našeho generátoru je možné zapojit osm stupňů a tím dosáhnout napětí až  $600\text{kV}$ . Marxův generátor používá pro nastavení napětí jiskřiště, kde po dosažení stanoveného napětí mezi elektrodami dojde k elektrickému oblouku a tím ke spojení jednotlivých stupňů generátoru do série. Obr. 12. ukazuje náhradní schéma generátoru, kde jsou

jiskřiště nahrazena spínači U1 až U8. Celková vybíjecí kapacita generátoru je dána vztahem:

$$C = \frac{C_1}{n} \quad (7)$$

kde  $n$  je počet stupňů generátoru a  $C_1$  je velikost nabíjecího kondenzátoru jednoho stupně (v našem případě odpovídá parametru Cs).

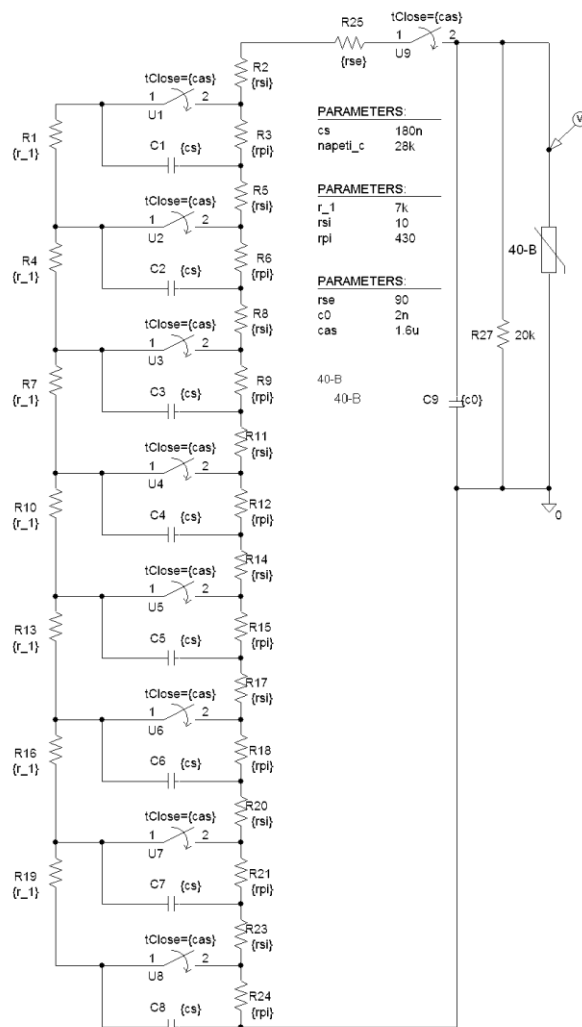
Špičkové výstupní napětí generátoru je dáno součtem jednotlivých stupňů (parametr napeti\_c):

$$U_{\text{výst}} = n \cdot U_{\text{1stupně}} \quad (8)$$

Celkovou energii generátoru pak můžeme vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{1}{2} (C \cdot U_{\text{výst}}^2) \quad (9)$$

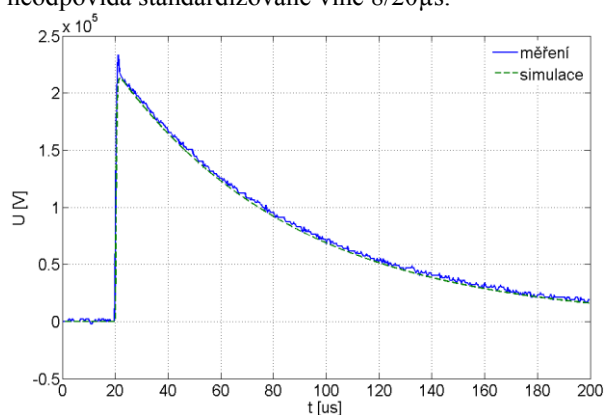
Velikost nabíjecích kondenzátorů je rovna  $180\text{nF}$ , celková kapacita dle rovnice (7) je rovna  $22,5\text{nF}$ . Maximální špičkové výstupní napětí je dané elektrickou pevností kondenzátorů C1-C8. Z těchto



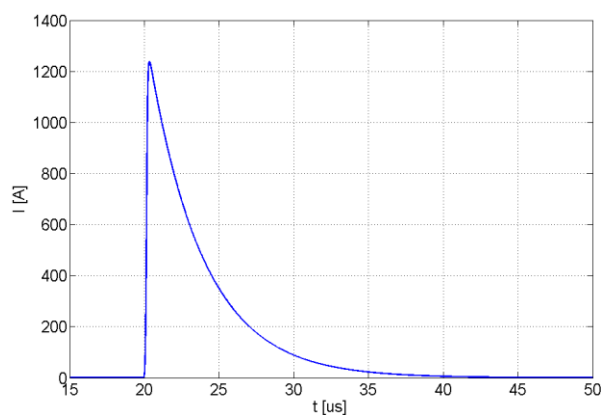
hodnot dle rovnice (9) určíme maximální energii generátoru,  $W=4050J$ .

Obr. 12: Marxův generátor

Naměřenou výstupní napěťovou vlnu generátoru naprázdno a výsledek počítačové simulace ukazuje Obr. 13. Na změřené vlně se opět projeví parazitní vlastnosti generátoru, je zde patrný překmit napětí. Pokud zanedbáme překmit napětí, poté naměřený průběh odpovídá počítačové simulaci. Zkratový proud není v naší laboratoři možné změřit, byla provedena pouze simulace, průběh zkratového proudu je ukázán na Obr. 14. Je patrné, že tento neodpovídá standardizované vlně  $8/20\mu s$ .



Obr. 13: Průběh napětí naprázdno

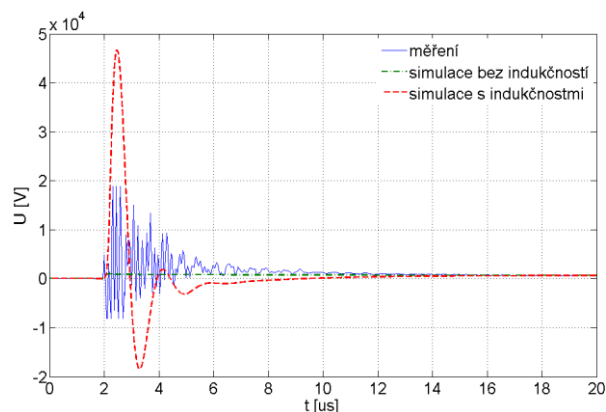


Obr. 14: Průběh proudu nakrátko

Při testování varistoru na generátoru byly provedeny dva typy zkoušek, při prvním byl varistor připojen vodičem přímo ke generátoru (viz. Obr.13), při druhém byl obvod rozpojen mezi varistorem a voltmetrem, kdy po dosažení přeskokového napětí došlo k zapálení oblouku a tím se obvod propojil (simulace úderu blesku).

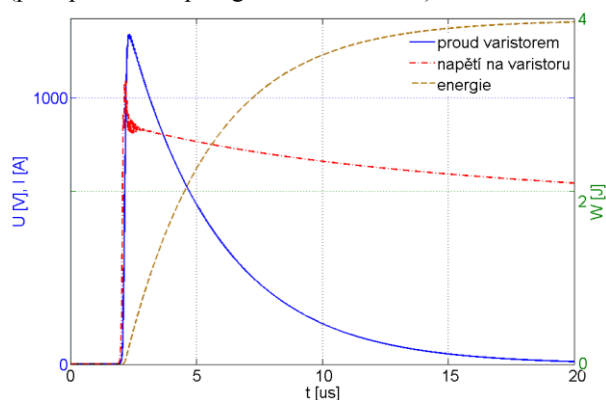
Naměřené průběhy napětí na varistoru při přímém spojení s generátorem jsou zobrazeny na Obr. 16. Špičkové výstupní napětí v tomto případě bylo nastaveno na 200kV. Při měření došlo po otevření varistoru k rozkmitání obvodu, což je opět způsobeno především parazitní indukčností propojovacích vodičů, kdy v kombinaci s kapacitou varistoru a dalšími parazitními kapacitami dochází k rezonanci

obvodu a vzniku tlumených kmitů. Při počítačové simulaci k těmto rezonancím nedocházelo, ale pro ověření předpokladu parazitních indukčností byly zapojeny sériově s varistorem indukčnosti (velikost zvolena na  $14,5\mu H$ ), v tomto případě již k rezonanci došlo. Spínací napětí varistoru při simulaci bez indukčností bylo 881V, s indukčnostmi přibližně 46kV, nicméně tato hodnota nemá přesnou vypovídací hodnotu, šlo pouze o ověření předpokladu. Při měření bylo spínací napětí (po odeznění přechodového jevu) 848V.



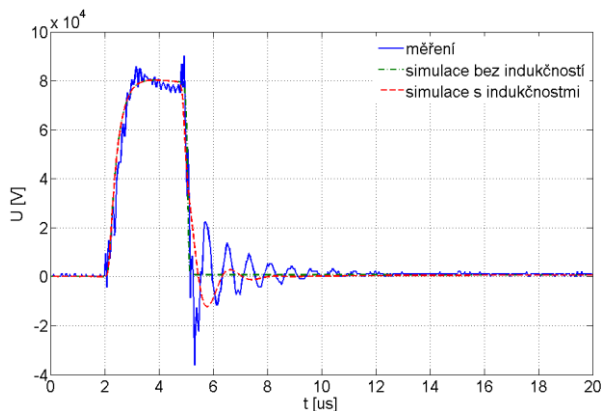
Obr. 15: Průběh napětí na varistoru

Obr.16. ukazuje simulované průběhy, kromě napětí na varistoru jsou zde uvedeny průběhy proudu varistorem a absorbovaná energie. Předpoklad před měřeními byl, že varistor absorbuje velké množství energie, nicméně simulace tento předpoklad nepotvrdila. Absorbovaná energie byla pouze cca. 4J (pro špičkové napětí generátoru 200kV).



Obr. 16: Simulované průběhy

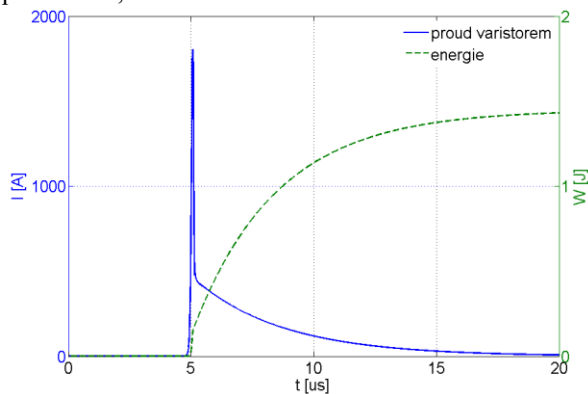
Výsledky z nepřímého spojení varistoru s generátorem jsou ukázány na Obr. 17.



Obr. 17: Průběh napětí na varistoru

Jelikož byl voltmetr umístěn v místě rozpojení obvodu (nikoliv na varistoru), je možné odečíst špičkové napětí generátoru, které bylo přibližně 80kV. Průběh v čase mezi 2 – 5 $\mu$ s odpovídá vlně 1,2/50 $\mu$ s a tato doba je potřebná k vytvoření elektrického oblouku. Po vytvoření oblouku dochází k otevření varistoru a opět je zde patrný přechodový jev, který byl zohledněn i při jedné ze simulací. Spínací varistorové napětí při simulaci bez zapojení parazitních indukčností bylo 830V. Naměřené spínací napětí po odeznění přechodového jevu bylo 1068V, ovšem tato hodnota je zkreslena rozlišením rozsahu osciloskopu (20kV na dílek, min. rozlišení cca. 250V).

Simulovaný proud varistorem a absorbovaná energie jsou vyobrazeny na Obr. 18. I v tomto případě byla absorbovaná energie velmi malá, přibližně 1,5J.



Obr. 18: Simulované průběhy

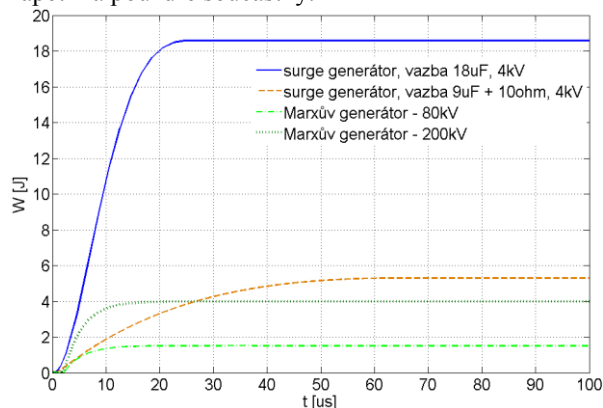
## ZÁVĚR

Cílem článku bylo seznámení se základními principy a parametry varistorů, včetně platné normalizace týkající se přepětových ochran. Díky velmi zajímavým katalogovým parametrům varistoru Strikesorb 40-B byl tento vybrán pro měření, ke kterým z důvodu přesnější interpretace výsledků byly provedeny počítačové simulace v programu PSpice. Shrnutí výše uvedených naměřených či nasimulovaných výsledků je uvedeno v Tab. 2, kde neuvedené hodnoty nebylo možné změřit.

Tab. 2: Shrnutí výsledků

		Měření	Simulace
Surge generátor 4kV, 9+10	Spínací U	1017V	792.67V
	Špičkový I	277.5A	274.1A
Surge generátor 4kV, 18	Spínací U	967.7V	922.71V
	Špičkový I	1660A	1547A
Marx generátor 80kV nepřím	Spínací U	1068V	830V
	Špičkový I	-	1801A
Marx generátor 200kV přímo	Spínací U <sub>i</sub>	848V	881V
	Špičkový I	-	1240A

Velmi zajímavé výsledky jsou pro absorbované energie varistorem (Obr. 19). Při standardních testech s generátorem kombinované vlny byla absorbovaná energie maximálně 18,4J při připojení varistoru přes impedanci 18 $\mu$ F a špičkovém výstupním napětí 4kV. Při připojovací impedanci 9 $\mu$ F + 10 $\Omega$  byla absorbovaná energie rovna 5,3J. Tyto hodnoty energie jsou pro varistor Strikesorb 40-B velmi malé, proto bylo rozhodnuto o nestandardním testování na Marxově generátoru, který má energii až 600J (při výstupním napětí 600kV). Při těchto testech byl předpoklad zničení varistoru, proto byly nejprve voleny nízké amplitudy napětí 80kV. Hodnoty výstupního napětí generátoru byly zvyšovány až na 280kV, při kterých nedošlo k poškození varistoru. Z tohoto důvodu vznikly počítačové simulace, které ukázaly, že konečná absorbovaná energie varistorem je velmi malá, řádově J (cca. 4J pro výstupní napětí 200kV). To je dáno velkou ztrátou energie na jednotlivých prvcích generátoru (především na sériovém rezistoru R25) a také nedefinovanou proudovou vlnou nakrátko (viz Obr. 14), která se velmi liší od vlny 8/20 $\mu$ s. Nasimulovaná vlna odpovídá časům přibližně 0,4/3 $\mu$ s. Tyto testy alespoň ukázaly rychlou reakci při otevření, kdy se varistor vždy bezpečně otevřel a nevznikl žádný přeskok napětí na pouzdře součástky.



Obr. 19: Absorbovaná energie varistorem

Varistor byl také testován dlouhodobě na generátoru kombinované vlny, při kterém u testů konvenčních varistorů (již po několika desítkách impulsů) dochází k degradaci polovodičového

materiálu z důvodu tepelného namáhání a tím ke zhoršování parametrů varistoru (změna voltampérové charakteristiky, která se projevuje zvýšením svodového proudu varistoru). Při dlouhodobé zkoušce bylo špičkové výstupní napětí generátoru nastaveno na 4kV s opakovacím časem impulsů 10s, celkový počet impulsů byl 5000. Měřením VA charakteristiky varistoru Strikesorb 40-B před a po dlouhodobém testu se ukázalo, že tato se nezměnila, tudíž parametry nebyly zhoršeny.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl finančně podpořen Evropským fondem regionálního rozvoje (ERDF) EU, operační program Výzkum a vývoj pro inovace, prioritní osa 2.2 Regionální VaV centra a MŠMT, reg. č. projektu: CZ.1.0.5/2.1.00/03.094, z grantu Grantové agentury České Republiky GA102/09/1164 a grantu Studentské grantové soutěže SGS-2010-037.

## LITERATURA

- [1] EPCOS: *SIOV metal oxide varistor - General technical information*, 2007
- [2] ČSN EN 61634-11: *Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 11: Přepětiová ochranná zařízení zapojená v sítích nízkého napětí - Požadavky a zkoušky. Změna A11*, Praha: ČNI, 2007
- [3] ČSN EN 61000-4-5: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-5: Zkušební a měřicí technika - Rázový impuls - Zkouška odolnosti*, Praha: ČNI, 2007
- [4] *Strikesorb Product Information* [online], [cit. 19.dubna 2011], dostupné na Internetu: <[http://www.raycapinc.com/docs/strikesorb\\_ds\\_en.pdf](http://www.raycapinc.com/docs/strikesorb_ds_en.pdf)>