

# Optoelektronický přenos analogových signálů v podmínkách silnoproudých zkušeben

Ing. PAVEL MACURA,

Výzkumný ústav silnoproudé elektrotechniky, Praha-Běchovice

621.391.6

*V článku jsou uvedeny důvody k použití optoelektronického přenosu informace v silnoproudých zkušebnách. Je proveden rozbor elektromagnetického rušení vznikajícího při zkratových zkouškách. Je ukázán vliv rušení na funkci nedokonalé stíněných optoelektronických systémů a uvedeny vlastnosti analogových optoelektronických systémů s různými způsoby modulace intenzity optického záření. Stručně jsou popsány optoelektronické systémy vyvinuté ve VÚSE. Na oscilogramech je ukázáno použití optoelektronických systémů při zkouškách vypínatů vvn.*

## 1. Úvod

V některých oblastech průmyslu a výzkumu vzrůstá potřeba měřicích systémů, schopných funkce v podmínkách silného elektromagnetického rušení a zaručujících elektrickou izolaci mezi různými místy měření a místem zpracování informace. Typickým příkladem jsou silnoproudé zkušebny, jakou je v ČSSR zkratovna VÚSE, kde se zkoušejí elektrické přístroje proudy řádu 10 kA na hladině nízkého až velmi vysokého napětí. Průběhy proudu, napětí a některých neelektrických veličin jsou při těchto zkouškách měřeny prostřednictvím čidel (bočník, dělič, snímač tlaku atd.), která na svém výstupu poskytují signál analogového charakteru. Klasické způsoby měření, kdy měřicí soustava je tvořena čidlem, koaxiální kabelovou trasou a záznamovým zařízením, jsou doprovázeny řadou problémů [1].

1. Není možné měřit veličiny na potenciálu vn a vvn.
2. Nelze přivést na společné záznamové zařízení určitý počet informací z různých míst zkušebního obvodu. I když všechna čidla budou uzemněna, prostorová rozlehlost zkušebního obvodu a velké zkratové proudy znemožní zaručit jednotný vztažený potenciál těchto měření.
3. Zkušební obvody jsou zdroji silných rušivých elektromagnetických polí. Strmosti napětí dosahují 10 kV/μs při regulérním průběhu zkoušky a řádově MV/μs při elektrickém průrazu. Zkratové proudy dosahují 50 kA. V důsledku toho tečou po pláštích koaxiálních kabelů rušivé proudy, způsobené jednak kapacitní vazbou na zkušební obvod, jednak magnetickou indukcí do smyček, tvořených spojením plášťů kabelů u čidla a u záznamového zařízení. Vzniká tak rušivé napětí, které se superponuje na užitečný signál a může jej i několikanásobně převýšit.

Uvedené problémy je možné vyřešit náhradou koaxiálních kabelových tras světlovodnými trasami. Vysílače optoelektronických přenosových systémů se umístí u čidla a přijímače u záznamového zařízení.

## 2. Rušivá elektromagnetická pole v silnoproudých zkušebnách

Nosiče informace jsou při přenosu pomocí optického záření neutrální fotony, takže signál ve světlovodu není ovlivňován vnějším elektromagnetickým polem. To však

neplatí o převodnicích elektrického signálu na optické záření (vysílače) a optického záření na elektrický signál (přijímače), jejichž elektronické obvody jsou vnějším elektromagnetickým polem značně ovlivňovány. Rušivá pole pronikají do optoelektronických systémů jednak po napájecích přívodech, jednak přímou elektromagnetickou vazbou, pokud systém není dostatečně odstíněn.

Při návrhu stínících krytů, napájecích obvodů a vlastních elektronických obvodů optoelektronických přenosových systémů je nutné vycházet ze znalosti elektrických a magnetických polí, která zkoušky elektrických přístrojů doprovázejí.

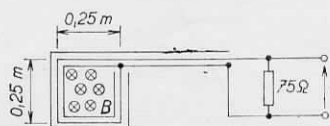
### 2.1 Magnetické pole

Rušivé magnetické pole při zkratové zkoušce má nízkofrekvenční a vysokofrekvenční složku. Nízkofrekvenční složka je způsobena zkratovým proudem řádu 10 kA o průmyslové frekvenci. Magnetickou indukcí  $B$  a intenzitou magnetického pole  $H$  ve vzdálenosti  $r$  od proudovodiče lze vypočítat podle vztahů

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} \cdot I, \quad (1)$$

$$H = \frac{1}{2\pi r} \cdot I. \quad (2)$$

Při proudu  $I = 40$  kA ve vzdálenosti 0,5 m má magnetická indukce hodnotu  $B = 16$  mT a intenzita  $H = 12,73$  kA/m.



Obr. 1. Smyčková sonda pro měření 1. derivace magnetické indukce.

Vysokofrekvenční složka magnetického pole je způsobena rychlými přechodnými proudy, které vznikají např. při spínání nabitých kondenzátorových baterií pomocí jiskřišť nebo při elektrickém průrazu ve zkoušeném zařízení. Vř proudy se uzavírají i kapacitní vazbou do země

na nejrůznějších místech zkušebního obvodu, takže je prakticky nemožné vypočítat magnetickou indukci a intenzitu pro vř složku magnetického pole.

Abychom získali obraz o rušivém magnetickém poli během zkratové zkoušky, používáme smyčkovou sondu (obr. 1), která měří 1. derivaci magnetické indukce. Sonda je tvořena jedním závitem koaxiálního kabelu, čímž je stíněna proti kapacitní vazbě na zkušební obvod. Na výstupu sondy dostáváme napětí podle vztahu

$$u(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -S \frac{dB(t)}{dt} = -\mu_0 S \frac{dH(t)}{dt} = -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{di(t)}{dt}, \quad (3)$$

kde  $i(t)$  je zkratový proud,  
 $\Phi(t)$  — magnetický tok,  
 $S$  — plocha smyčky,  
 $u(t)$  — napětí na výstupu smyčkové sondy.

Pro harmonický průběh, kdy

$$B(t) = B_0 \cdot e^{j\omega t}, \quad (4)$$

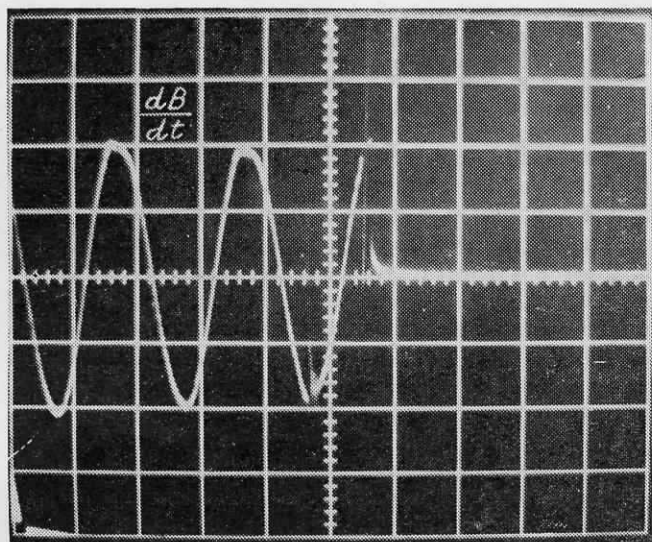
platí, že

$$\frac{dB(t)}{dt} = j\omega B_0 e^{j\omega t} = j\omega B(t). \quad (5)$$

Potom mezi napětím na výstupu sondy  $u(t)$  a magnetickou indukcí  $B(t)$  platí vztahy

$$u(t) = -j\omega B(t) S, \quad (6)$$

$$B(t) = -\frac{u(t)}{j\omega} \cdot \frac{1}{S}. \quad (7)$$

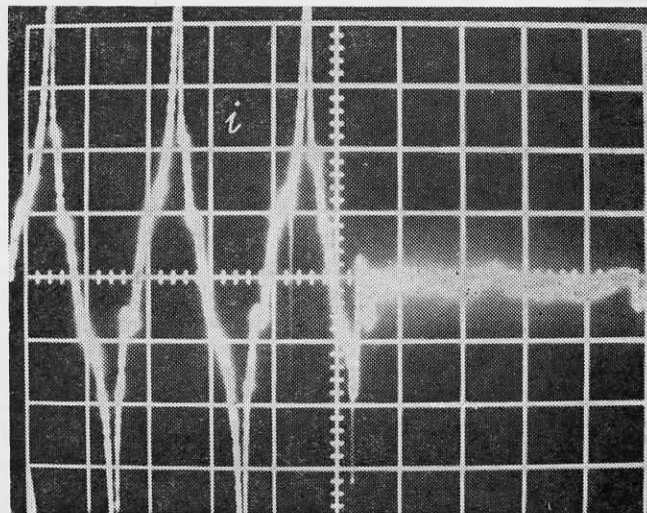


Obr. 2. Průběh 1. derivace magnetické indukce ve vzdálenosti 0,6 m od proudovodiče při syntetické zkratové zkoušce 45 kA.

$dB/dt \dots 3,2 \text{ Ts}^{-1}/d, t \dots 10 \text{ ms}/d.$

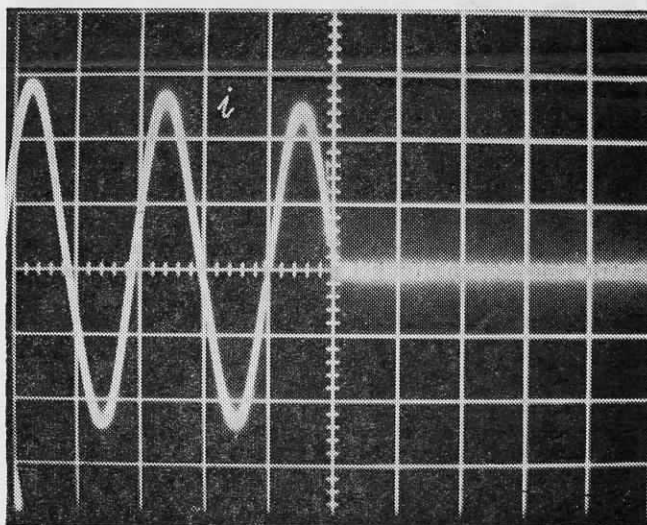
Příklad průběhu derivace magnetické indukce, sejmutého při syntetické zkratové zkoušce vypínače vvn, je uveden na obr. 2. Vliv magnetického pole na funkci elektronických obvodů nedostatečně stíněného optoelektronického systému je znázorněn na obr. 3. Správný prů-

běh proudu, sejmutý prostřednictvím dobře stíněného systému je uveden na obr. 4.



Obr. 3. Zkreslený průběh zkratového proudu — vliv magnetického pole na funkci nedostatečně stíněného optoelektronického přenosového systému.

$i \dots 20 \text{ kA}/d, t \dots 10 \text{ ms}/d.$



Obr. 4. Nezkreslený průběh zkratového proudu sejmutý prostřednictvím dobře stíněného optoelektronického přenosového systému

$i \dots 20 \text{ kA}/d, t \dots 10 \text{ ms}/d.$

## 2.2 Elektrické pole

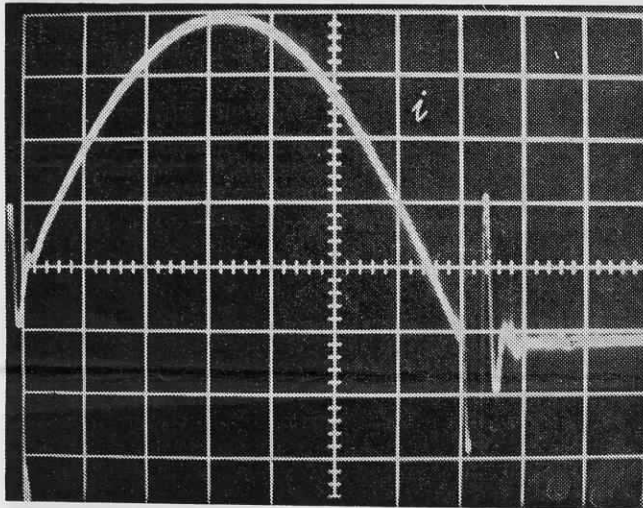
V okamžiku, kdy spínací přístroj vypne zkratový proud, začne na jeho svorkách vzrůstat napětí. Průběh přechodného děje po vypnutí závisí na zapojení zkušebního obvodu, s jehož pomocí se reguluje průběh zotaveného napětí tak, aby odpovídal podmínkám uvedeným v normě [2]. Strmost napětí po vypnutí proudu dosahuje až  $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$ . K ještě větší rychlosti změny napětí dochází při elektrickém průrazu ve zkoušeném přístroji, kdy strmost dosahuje řádově  $\text{MV}/\mu\text{s}$ . To např. znamená, že napětí na svorkách spínacího přístroje se zhroutí z hod-

noty 200 kV na nulu v době kratší než 200 ns. V důsledku toho se indukují do elektronických obvodů nedostatečně stíněných měřicích zařízení kapacitní proudy podle vztahu

$$i_{cr} = C_v \frac{du}{dt}, \quad (8)$$

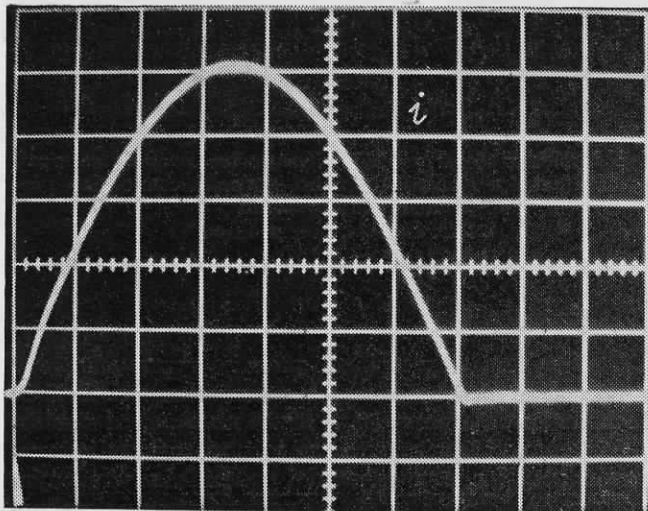
kde  $i_{cr}$  je rušivý kapacitní proud,  
 $C_v$  — vazební kapacita mezi zkušebním obvodem a měřicím zařízením.

Vliv elektrického pole na funkci nedostatečně odstíněného a odrušeného optoelektronického systému je znázorněn na obr. 5. V tomto případě se jednalo o pronikání rušivého pole po napájecích přívodech od akumulátoru.



Obr. 5. Zkreslený průběh vstřikovaného proudu — vliv elektrického pole na funkci nedostatečně stíněného optoelektronického přenosového systému.

$i \dots 1 \text{ kA/d}, t \dots 0,2 \text{ ms/d.}$



Obr. 6. Nezkreslený průběh vstřikovaného proudu sejmутý prostřednictvím dobře stíněného optoelektronického přenosového systému.

$i \dots 1 \text{ kA/d}, t \dots 0,2 \text{ ms/d.}$

Po vypnutí zkratového proudu jsou patrné kmity, které měly původ v přechodném ději zotaveného napětí. Správný průběh proudu sejmутý pomocí dobře odstíněného a odrušeného optoelektronického systému je uveden na obr. 6.

Bezporuchové funkce optoelektronického systému (obr. 4, obr. 6) v prostředí se silným elektromagnetickým rušením v širokém pásmu kmitočtů je možné dosáhnout vhodným stíněním systému a jeho napájecích obvodů. Elektronické obvody vysílače i přijímače jsou umístěny ve stínicím krytu z dvojího materiálu — železa a mědi. Stínicí účinek železa se uplatňuje hlavně pro nízkou složku magnetického pole, mědi pro vysokou složku magnetického pole a pro elektrické pole. Vysílač i přijímač je napájen z akumulátorů umístěných rovněž ve stínicích krytech. Napájecí přívoody od akumulátoru jsou provedeny stíněným vodičem a filtrovány ve vysílači i přijímači průchodkovými filtry.

### 3. Kritéria výběru optoelektronických přenosových systémů pro měření v silnoproudých zkušebnách

Pro přenos analogových signálů je možné použít různé typy optoelektronických systémů, které se liší způsobem modulace intenzity optického záření:

- systémy s přímou intenzitní modulací, kde intenzita optického záření je přímo úměrná amplitudě vstupního elektrického signálu,
- systémy s frekvenční modulací, kde vstupní signál moduluje pomocnou nosnou frekvenci oscilátoru, jehož výstup ovládá proud vysílače diodou,
- systémy s různými druhy impulsových modulací (impulsová šířková, frekvenční, polohová atd.), kde vstupní signál je přeměněn ve sled modulovaných impulsů a vysílače dioda pracuje v režimech zář — nezář.

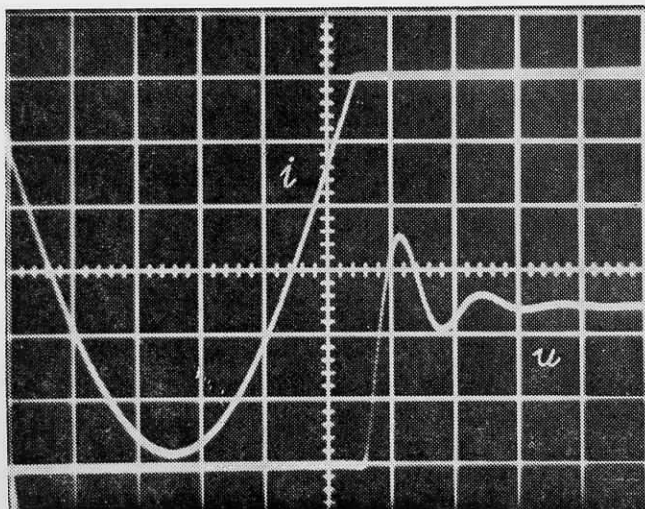
Pro měření, kde se nevyžaduje velká přesnost, ale rozhodujícím parametrem je krátká doba náběhu, jsou vhodné systémy s přímou intenzitní modulací. Jejich horní mezní kmitočet je v podstatě omezen dynamickými vlastnostmi vysílače diody a rychlostí odezvy fotodetektoru. K nevýhodám uvedených systémů patří špatná linearita, pokles zesílení na nízkých frekvencích vlivem vlastního ohřevu vysílače diody [3] a velká citlivost na změny útlumu v optoelektronické trase (teplotou, stárnutím, konektory, změnou délky světlovodu). To je limituje v použití ve zkušebnách průmyslového typu, neboť vyžadují časté kontroly a seřizování. Navíc jsou nejméně odolné proti rušivým elektromagnetickým polím.

Systémy s frekvenční modulací mají nižší horní mezní kmitočet, lze u nich však dosáhnout lepší linearity a vyrovnané frekvenční charakteristiky i v oblasti nejnižších kmitočtů. Jsou málo citlivé na změny útlumu v optoelektronické trase a odolné proti rušení.

Podobné vlastnosti, jako systémy s frekvenční modulací, mají i systémy s impulsovou šířkovou modulací. Používají se hlavně pro jednoduchost modulátoru a demodulátoru šířkově modulovaného signálu. Z uvedených typů mají nejnižší horní mezní kmitočet, protože je potřeba velká šířka pásma pro kvalitní přenos hran šířkově modulovaných impulsů. Jsou velmi odolné proti rušení.

#### 4. Optoelektronické přenosové systémy užívané ve VÚSE

Ve VÚSE jsou v současné době v provozu dva typy optoelektronických přenosových systémů. První z nich je systém s frekvenční modulací, přenášené pásmo kmitočtů 0 až 1,7 MHz ( $-3$  dB), doba náběhu přechodné charakteristiky 200 ns. Systém je vhodný pro všechny druhy měření ve zkratovně, včetně měření rychle pro-



Obr. 7. Záznam vstřikovaného proudu a napětí při syntetické zkratové zkoušce vypínače vvn. Proud měřen prostřednictvím optoelektronického systému s impulsovou šířkovou modulací.

$i \dots 1 \text{ kA/d}$ ,  $u \dots 40 \text{ kV/d}$ ,  $t \dots 0,2 \text{ ms/d}$ .

měnných přechodných zotavených napětí. Druhý je jednodušší systém s impulsovou šířkovou modulací, přenášené pásmo kmitočtů 0 až 17 kHz ( $-3$  dB), doba náběhu přechodné charakteristiky 20  $\mu\text{s}$ . Používá se pro měření jevů o průmyslovém kmitočtu. Oba přístroje byly popsány v [4].

**Оптоэлектронная передача аналоговых сигналов в условиях лаборатории сильных токов.** В статье приводятся доводы, ведущие к применению оптоэлектронной передачи информации в лабораториях сильных токов. Производится анализ электромагнитных помех, возникающих при испытаниях разрывных мощностей. Описано влияние помех на работу плохо экранированных оптоэлектронных систем и приводятся свойства аналоговых оптоэлектронных систем, в которых используются различные способы модуляции яркости оптического излучения. Дается краткое описание оптоэлектронных систем, разработанных в Научно-исследовательском институте сильных токов. В качестве примера приводятся осциллограммы, полученные при помощи оптоэлектронных систем при испытаниях высоковольтных выключателей.

**Optoelektronische Übertragung analoger Signale in den Bedingungen der Starkstrom-Prüfstellen.** Im Artikel werden

Použití optoelektronického systému s impulsovou šířkovou modulací je dokumentováno na obr. 7, kde je uveden záznam vstřikovaného proudu a zotaveného napětí při syntetické zkratové zkoušce vypínače vvn. Proud byl snímán z bočníku na potenciálu prostřednictvím uvedeného systému, napětí bylo měřeno tlumeným kapacitním děličem proti zemi a signál veden k osciloskopu koaxiálním kabelem. Současný záznam těchto dvou jevů na jednom osciloskopu by bez použití optoelektronického přenosového systému nebyl možný.

#### 5. Závěr

Optoelektronický přenos signálu je velkým přínosem pro silnoproudé zkušebny. Umožňuje měřit veličiny dřívejšími metodami neměřitelné (přenos informace z potenciálu vvn) a zkvalitnit dosavadní způsoby měření (rozpojení zemních smyček, redukce rušení), což přispívá k vývoji a ověřování elektrických přístrojů pro energetické sítě i k rozvoji nových zkušebních metod. V neposlední řadě zaručuje bezpečnou obsluhu a ochranu významových a vyhodnocovacích zařízení.

Při zkouškách se snímá a zaznamenává časový průběh analogového signálu. Proto byly ve VÚSE vyvinuty systémy, umožňující přenos takového signálu. Značná intenzita elektromagnetických rušivých polí a požadavek na stabilitu přenosových vlastností systémů při výměně či změně délky světlovodu vedly k vývoji optoelektronických přenosových systémů s frekvenční a s impulsovou šířkovou modulací. Oba se v několikaletém provozu osvědčily a umožnily získat řadu poznatků pro rozvoj elektrických přístrojů, jako jsou vakuové stykače a vypínače vvn.

#### Literatura

- [1] Macura, P.: Optoelektronické přenosové systémy pro měření při zkratových zkouškách vypínačů vn a vvn. Elektrotechnický obzor, 71, 1982, č. 9, s. 499 až 501.
- [2] Vypínače vn a vvn. ČSN 35 4220.
- [3] Hasegawa, O. - Yagawa, N.: Low frequency response to AlGaAs double heterojunction LEDs. IEEE Trans., ED-28, 1981, č. 4, s. 385 až 389.
- [4] Hendrich, J. - Macura, P.: Optoelektronické přenosové systémy pro měření v silnoproudých zkušebnách. Sborník přednášek semináře „Dny nové techniky elektronického výzkumu 83“, Praha, 14. až 16. 6. 1983.

Gründe des Einsatzes der optoelektronischen Informationsübertragung in Starkstrom-Prüfstellen angeführt. Eine Analyse der elektromagnetischen Störungen, die bei den Kurzschlussprüfungen entstehen, wird durchgeführt. Der Einfluss der Störungen auf die Funktion unvollkommen abgeschirmter optoelektronischer Systeme wird gezeigt und Eigenschaften analoger optoelektronischer Systeme mit verschiedenen Modulationsarten der Intensität der optischen Strahlung angegeben. Optoelektronische Systeme, die im Institut für Starkstromelektrotechnik VÚSE entwickelt wurden, werden kurz beschrieben. Auf Oszillogrammen wird Anwendung optoelektronischer Systeme bei den Prüfungen der Höchstspannungsschalter gezeigt.

**Optoelectronic transmission of analog signals in the conditions of power engineering laboratories.** The article states the reasons for using optoelectronic transmission of