

Mikrovlnný senzor pro extrémní provozní podmínky

V článku je představen nový typ senzoru pro měření polohy hladiny na principu vedených mikrovlnných impulsů (TDR), který lze používat při provozním tlaku až do 40 MPa a teplotě od -200 do $+400$ °C. Senzor je vybaven vlnovodem s jednou tyčí nebo lanem (Goubauovo vedení) necitlivými na usazeniny. Utěsněn je třemi redundantními těsnícími prvky řazenými za sebou bez hluchých prostorů. Tím je současně zabezpečena spolehlivá funkce senzoru i při porušení primárního těsnění. Maximální korozní odolnost je dosaženo použitím vybraných konstrukčních materiálů (velmi čistá keramika na bázi oxidu hliníku, grafit). Mechanicky robustní provedení a prokázaná shoda podle nařízení vlády č. 26/2003 Sb. (Pressure Equipment Directive 97/23/EC) umožňují senzor použít v zařízeních se zvýšenými požadavky na funkční bezpečnost až do stupně SIL 2 podle normy IEC 61511-1.

1. Úvod

Radar s vedenými impulsy, označovaný také TDR (*Time Domain Reflectometry*), je jako prostředek k měření polohy hladiny znám téměř 40 let [1]. Vysokofrekvenční impulsy jsou v něm vedeny podél sondy, fungující jako povrchový vlnovod. Vyslaný signál se po odrazu v místě, kde vlnovod protíná hladinu měřeného produktu, vrací zpět do senzoru a z doby jeho průletu je stanovena okamžitá poloha hladiny. Jelikož se impulsy pohybují rychlostí světla, jsou k dispozici velice krátké doby průletu – rozlišení 1 mm odpovídá doba 7 ps. Aby mohl být odražený signál digitalizován a zpracován mikroprocesorem, je vzorkován a převáděn do zvukového pásma.

Předností radarů s vedenými impulsy je jejich relativní nezávislost na vlastnostech měřeného produktu, jako jsou hustota, dielektrická konstanta nebo vodivost, na provozních podmínkách, tj. např. na neklidu hladiny a tvorbě pěny, a na vlastnostech zásobníku, v němž se měří (tvar, rozměry, přítomnost vestaveb).

Radary s vedenými impulsy nebyly až do poloviny devadesátých let dvacátého století při řízení spojitých technologických procesů příliš rozšířené. Jedním z důvodů byla poměrně velmi složitá konstrukce elektronických obvodů, např. v porovnání s kapacitními sondami. V současné době jsou však k dispozici výkonné mikroprocesory s malou spotřebou a během posledních deseti let výrazně poklesly ceny ostatních komponent, jako jsou např. grafické displeje, zesilovače s malým šumem atd. V důsledku tohoto vývoje lze nyní používat velmi dokonalé výpočtové algoritmy a dobře čitelné displeje, které těmto přístrojům společně zaručují snadné spouštění a spolehlivý provoz. Výsledkem je výrazný nárůst poptávky po radarech typu TDR, které jsou nyní již akceptovány jako jedna ze standardních měřicích metod [2].

Se senzorem popsaným v dalším textu lze princip TDR použít i v takových provozních podmínkách, které dosud byly pro tuto metodu příliš extrémní a kde dosud dominovaly plováky, kapacitní sondy a snímače rozdílu tlaků, a to i se všemi svými známými omezeními.

2. Konstrukce senzoru

2.1 Sestava

Základní vlastností, která je určující pro oblibu a širokou použitelnost senzoru využívajícího princip TDR, je jeho pouze velmi malá citlivost na vlivy specifické různým měřicím úlohám. Nejlepší vlastnosti z tohoto hlediska má senzor s jednou vodící tyčí (pro zjednodušení je takto dále označován i senzor s jedním lanem a závažím), který v porovnání s jinými typy (zejména dvoutyčovým a koaxiálním) vykazuje podstatně lepší prostorové šíření měřicího signálu. Jednotyčové uspořádání se vyznačuje

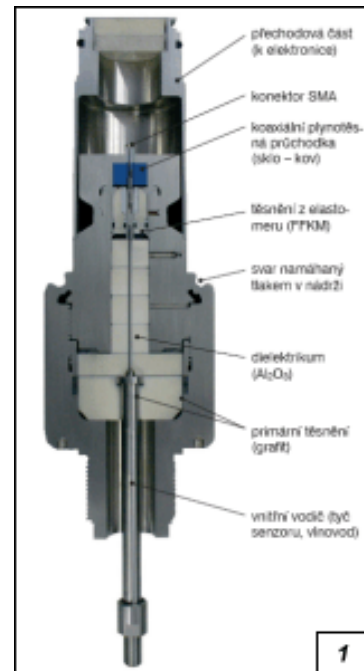


Endress+Hauser - meranie hladiny – hladinomery – radary – mikrovlnné reflexné snímače Levelflex
vedené mikroimpulzy – tyčové radary – vedené radarové snímače – radarové stavoznaky – TDR - impulz

mj. minimálními rušivými odrazy od úsad produktu na tyči (laně) a zanedbatelným tlumením vysokofrekvenčního signálu. Další předností jednotyčového senzoru je, že ani několikametrové tyče nepotřebují v oblasti aktivního měřicího rozsahu distanční rozpěrky, na kterých se snadno usazuje měřená látka, popř. mohou být poškozeny působením vibrací, teplotních šoků nebo koroze.

Obr. 1. Podélný řez senzorem typu TDR

Podélný řez senzorem určeným pro jednotyčový radar typu TDR je na obr. 1. Horní část pouzdra senzoru vyrobeného z austenitické oceli třídy 17 350 (316L) a odolného proti tlaku obsahuje plynotěsnou koaxiální průchodku ze skla a z kovu, k níž je signál veden ohebným koaxiálním kabelem s konektorem typu SMA. Další díly pod průchodkou jsou z konstrukčních materiálů s velkou odolností a teplotní stabilitou. Dielektrikem je keramika na bázi Al_2O_3 s čistotou 99,7 %. Tento materiál oproti sklu nejenom nabízí větší mechanickou pevnost, ale při styku s vnitřním prostředím nádrže také výrazně lépe odolává hydrolyze. Protože pro teploty až do 400 °C není vhodný žádný známý elastomer a dostatečně odolné není ani svařené spojení ocel – keramika, jsou jako primární těsnění směrem k měřenému médiu použity grafitové ucpávky. Vnitřní vodič senzoru je vyroben ze slitiny Hastelloy C-22, materiálu s vynikající pevností (smluvní mez pružnosti naměřená při pokojové teplotě při trvalé deformaci 0,2 % je 427 MPa). Výsledkem je mez pevnosti sondy v ohybu 30 N·m při průměru vnitřního vodiče pouze 10 mm. Jako redundantní těsnění je použit tzv. O-kroužek z materiálu FFKM (druh perfluorelastomeru, látky kombinující pružnost fluorelastomerů s chemickou netečností PTFE).



Přechodová část senzoru nesoucí hlavici s elektronikou již není namáhána tlakem. Může mít proto tenké stěny, účinně omezující přenos tepla směrem k elektronice.

Koncepce těsnění se třemi redundantními stupni zajišťuje maximální bezpečnost senzoru. Protož neobsahuje žádné prázdné prostory, při jejichž zaplnění měřeným médiem by mohlo dojít ke změně jeho vysokofrekvenčních vlastností, funguje senzor beze změny i při selhání primárního těsnění na straně média. Tím je výrazně snížena pravděpodobnost vzniku nebezpečných skrytých poruch; to je důležité při použití v bezpečných zařízeních a umožňuje to použít daný senzor do úrovně bezpečnosti SIL 2 podle normy IEC 61511-1 (ČSN EN 61511-2). Těsnění předřazená směrem k médiu jsou určena především jako ochrana plynotěsné koaxiální průchodky na horním konci senzoru.

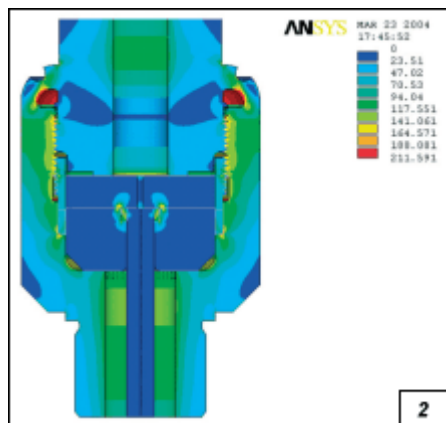
2.2 Mechanická pevnost

Velké tlaky v nádržích apod. představují velké potenciální nebezpečí, a proto ve většině zemí musí tlaková zařízení vyhovovat odpovídajícím předpisům. V Evropě je nejdůležitější tzv. Pressure Equipment Directive 97/23/EC (u nás nařízení vlády č. 26/2003 Sb.), podle kterého je popisovaný senzor klasifikován jako příslušenství odolávající tlaku kategorie I, při jehož konstrukci musí být splněny základní požadavky podle Přílohy 1 PED. Tyto požadavky jsou konkretizovány v harmonizovaných normách, jako je např. EN 13445 (ČSN EN 13445), z níž se při konstrukci senzoru vycházelo.

V důsledku složité geometrie senzoru je téměř nemožné použít při jeho návrhu analytické výpočty. Proto byla využita nelineární analýza metodou konečných prvků s použitím softwaru ANSYS Rev. 7.1 [3].

Na obr. 2 je jako příklad ukázáno modelové rozložení mechanického napětí v materiálu pouzdra senzoru při teplotě 20 °C a provozním tlaku 40 MPa. Model bere v úvahu i síly vzniklé předepnutím grafitových ucpávek. Současně se v tomto případě předpokládá, že provozní tlak působí i za grafitovým těsněním, tj. že primární těsnění brání průniku média není stoprocentně účinné. Navzájem odpovídající výsledky byly získány i při jiných kombinacích mezních podmínek, jako např. při přidavném působení tahových nebo bočních sil nebo při vyšších teplotách.

Obr. 2. Rozložení napětí v dolní části pouzdra senzoru v megapascalch podle hypotézy o změně tvaru (podle R. v. Misesa) při teplotě 20 °C a provozním tlaku 40 MPa



Velké napětí je patrné v oblasti svaru spojujícího horní a dolní část pouzdra senzoru. Přestože jsou spolu spojeny také závitem, část namáhání se přenáší i na samotný svar. Příčinou je radiální působení provozního tlaku na dolní část pouzdra senzoru, v jehož důsledku se zmenšuje styčná plocha závitů v závitovém spoji, spolu s axiální roztažností horní části pouzdra senzoru. Oba tyto vlivy zmenšují sílu přenášenou samotným závitovým spojem. Aby nebylo nutné sahát po složitých a nákladných svařovacích metodách, např. svařování elektronovým paprskem, je v oblasti svaru vysoustružen vlnovec, který svým tvarem a pružností namáhání svaru minimalizuje.

Při určování mechanické odolnosti pouzdra senzoru bylo postupováno tak, že byly vytvořeny dráhy napětí spojující místa s největší relativní deformací materiálu pouzdra a efektivní napětí podél těchto drah bylo následně linearizováno (s použitím hypotézy o změně tvaru podle Richarda von Misesa). Výsledkem linearizace jsou čistě membránová napjatost a kombinovaná, membránová a ohybová napjatost tzv. primární prvků. Primární prvky pokrývají sledovaný dílec v celém jeho průřezu a jsou určující z hlediska selhání dílce při jeho statickém namáhání. Podle normy EN 13445 je možné počítat s povolenou deformací o hodnotě 1 % z teplotně závislé meze pružnosti materiálu pouzdra, oceli 17 350. Deformace v důsledku samotné membránové napjatosti musí být menší než povolená hodnota dělená bezpečnostním součinitelem o hodnotě 1,5. Při hodnocení kombinované (membránové a ohybové) napjatosti se bezpečnostní součinitel neuplatňuje, tj. stačí, aby celková deformace od kombinované napjatosti nepřekročila hodnotu povolenou v normě.

Podle uvedených kritérií může být senzor zatížen tlakem 40 MPa jen do teploty do 100°C. Při vyšších teplotách přípustný mezní pracovní tlak postupně klesá, a to až na hodnotu 30 MPa při 400 °C.

Výsledky získané analýzou napjatosti pouzdra senzoru byly potvrzeny jeho statickými tlakovými zkouškami. Průchodka sklo – kov zůstala těsná i při zkušebním tlaku až 160 MPa.

2.3 Vysokofrekvenční vlastnosti

Z hlediska chování v oblasti vysokých frekvencí elektrických signálů se od senzoru typu TDR požaduje:

- maximální hodnota přenosu mezi koaxiálním přívodním kabelem a vlnovodem (přenos S_{12} , popř. S_{21}) s cílem získat co nejsilnější užitečný signál (při odrazu na povrchu produktu),
- minimální odraz přiváděného signálu zajišťující co nejmenší rušivý signál od senzoru (přenos S_{11}),
- vyloučení rezonancí ve využívaném frekvenčním pásmu, jež je typicky do 1,5 GHz; v opačném případě je užitečný signál znehodnocen superponováním „zvoněním„ senzoru.

Požadavky ad a) a b) přímo souvisejí s impedančním přizpůsobením přívodu a vlastního senzoru. Výstupní obvody elektroniky a koaxiální kabely mají obvykle impedanci 50 . Impedance vlnovodu s jednou tyčí je však této hodnotě značně vzdálena. Pro jednotyčovou sondu umístěnou v blízkosti kovové stěny nádrže platí [4]

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{2d}{b} \quad (1)$$

kde Z je impedance (Ω), d vzdálenost mezi tyčí sondy a stěnou nádrže (m), b průměr tyče sondy (m), ϵ dielektrická konstanta prostředí v okolí sondy.

Podle (1) má sonda s tyčí o průměru 16 mm ve vzduchu ($\epsilon \approx 1$) při vzdálenosti 100 mm od stěny nádrže výslednou impedanci 193 a při vzdálenosti 1 m od stěny nádrže 331. Podle [5] vychází při vzdálenosti tyče sondy 100 mm od stěny nádrže přizpůsobení $-4,6$ dB a při vzdálenosti 1 m přizpůsobení $-2,6$ dB. Uvedené, poměrně špatné hodnoty jsou pro jednotyčovou sondu typické a jsou příčinou velkých rušivých odrazů na přechodu mezi koaxiální průchodkou a vlnovodem s jednou tyčí. Tento druh rušení nicméně lze odstranit, a to odečtením echa prázdné nádrže od aktuálního echa při provozu [6]. S jednotyčovými sondami je možné polohu hladiny produktů s malou dielektrickou konstantou měřit pouze při použití tohoto speciálního algoritmu.

Naproti tomu k požadavku uvedenému v bodě c) musí být přihlédnuto již v konstrukci senzoru. Rezonance lze vyloučit jedině tím, že v senzoru je pouze jeden impedanční skok, tzn. že koaxiální průchodka má jako celek impedanci 50Ω , a nezpůsobuje tudíž žádné mnohonásobné odrazy. Impedance koaxiální průchodky je [4]

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{b_2}{b_1} \quad (2)$$

kde b_2 je průměr vnějšího vodiče, b_1 průměr vnitřního vodiče.

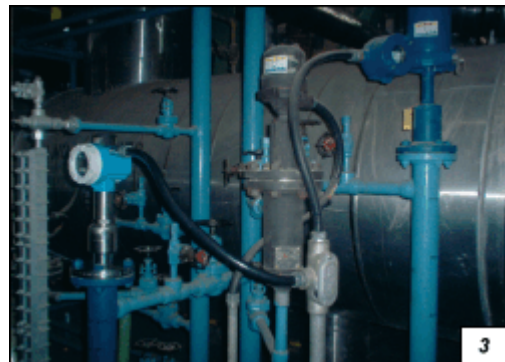
Průměr vnitřního vodiče musí být pro dostatečnou odolnost v ohybu nejméně 10 mm. Při relativně velké dielektrické konstantě ϵ_k keramiky použité v senzoru jako dielektrikum ($\epsilon_k = 10$) vychází průměr vnějšího vodiče 139 mm. Při tak velkém průměru by se vedle základního pracovního módu kmitání mohly v keramice šířit i vyšší módy, protože vlivem slabých vazeb na obou stranách průchodky by vznikl velmi kvalitní rezonátor a nebylo by zajištěno požadované potlačení rezonancí.

Proto byl zvolen menší průměr vnějšího vodiče, a to 55 mm, který má ovšem impedanci pouze $32,4 \Omega$. Jelikož byla délka této nevhodně přizpůsobené oblasti vědomě navržena jako velice malá, není zvolené řešení zdrojem žádného patrného rušivého signálu.

3. Příklady použití

Senzor popsaný v článku je již úspěšně používán v mnoha převodnicích polohy hladiny, které nacházejí uplatnění zejména v chemickém a petrochemickém průmyslu a v energetice.

Obr. 3. Použití radarového převodníku s popsaným senzorem typu TDR (na obrázku vlevo) pro měření polohy hladiny kondenzátu v elektrárně



Doposud se v mnoha těchto aplikacích převážně používaly plováky. Ty jsou však náchylné k usazování produktu; pak ukazují nižší úroveň hladiny, než je skutečná, nebo jsou unášeny vařícím se produktem a rychle se opotřebovávají, popř. přestávají měřit úplně.

V porovnání s kapacitními sondami není měření radarem s vedenými impulsy ovlivňováno změnou dielektrické konstanty produktu. Například hodnota dielektrické konstanty kondenzátu se zvyšující se teplotou klesá [7], což při použití zcela izolované kapacitní sondy způsobuje odpovídající chybu. Na obr. 3 je radarový převodník hladiny typu TDR použit právě k takovému měření.

Pro měření polohy hladiny při vysokých teplotách se používají také snímače tlaku. K oddělení senzoru snímače tlaku je v těchto případech obvykle nutné použít tzv. impulsní potrubí. Při nečekaném výskytu podtlaku v technologickém zařízení se však může impulsní potrubí samovolně vyprázdnit a následná změna hydrostatického tlaku způsobí chybu měření. Zmíněný senzor lze díky jeho velké teplotní odolnosti použít k přímému měření v kontaktu s horkým produktem, a to bez nebezpečí vzniku podobných problémů.

Endress+Hauser - meranie hladiny – hladinomery – radary – mikrovlnné reflexné snímače Levelflex
vedené mikroimpulzy – tyčové radary – vedené radarové snímače – radarové stavoznaky – TDR - impulz

(E+H)

Literatura:

- [1] JOHNSON, I. D.: *Apparatus for the Determination of Location of Interfaces Between Different Materials*. Přihláška patentu US 3,424,002, 1969.
- [2] SCHEUERMANN, A.: *Auf dem neusten Stand. CT-Umfrage: Füll- und Grenzstandmessgeräte für Flüssigkeiten*. Chemie Technik, 2004, 4, 36.
- [3] ZAMMERT, W.-U. (Esslingen University of Applied Sciences): *Festigkeitsbewertung kritischer Stellen des Sensors FMP 45* a PFEIFFER, H. (Endress+Hauser GmbH+Co. KG), osobní jednání, 2004.
- [4] MEGLA, G.: *Dezimeterwellentechnik*. 5. vydání, Verlag Berliner Union, Stuttgart, S. 94 ff., 1962.
- [5] MEINKE – GUNDLACH: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. 4. vydání, Band 1, Springer Verlag, Berlin, S. B8 ff., 1986.
- [6] PERDUE, K. L. – SWAGER, R. B.: *Processor Apparatus and Method for a Process Measurement Signal*. Přihláška patentu US 5,884,231, 1999.
- [7] KAATZE, U. – BEHRENDTS, R.: *Dielektrische Eigenschaften von Wasser und wässrigen Lösungen*. tm – Technisches Messen, 2002, 69, 5.