

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, Praha 6

Optovláknové extenzometry

Příručka

Ing. Jaromír Král, CSc.

Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D.

Doc. Ing. Petr Bouška, CSc.

Praha 2009

Anotace

Příručka obsahuje základní technické informace k zařízení SOFO firmy SMARTEC S.A. (Švýcarsko). Zařízení tvoří optovláknové extenzometry s dlouhou základnou, jednotka pro statická měření s interním optickým přepínačem a vstupem pro připojení doplňkových snímačů prostřednictvím vstupních jednotek ADAM 4000 (Advantech). Celý systém je určen pro dlouhodobé sledování stavebních konstrukcí, zejména různých typů betonových mostů.

Příručka je určena studentům, doktorandům a budoucím uživatelům této techniky měření. Kromě údajů výrobce k jednotlivým částem systému obsahuje vysvětlení základních pojmů, popis principu měření a specifických vlastností této techniky, popis instalace extenzometrů na konstrukci a doporučené metody použití.

Klíčová slova

Optická vlákna, interference, nízko-koherenční interferometrie, optovláknové extenzometry, konstrukce, statika, dynamika.

(Optical fibre, interference, low coherence interferometry, fibre optic strain gauges, structures, statics, dynamics).

Obsah

Anotace	1
Klíčová slova	2
Úvod	3
1 Optovláknové snímače	4
1.1 Optická vlákna	4
1.2 Interferometrické snímače se dvěma optickými vlákny	4
1.3 Snímače na bázi Fabry–Perotova interferometru	5
1.4 Snímače s Braggovou mřížkou	5
1.5 Distribuované měření poměrné deformace nebo teploty	6
2 Systém SOFO (Smartec S.A.)	6
2.1 Princip měření	6
2.2 Extenzometr SOFO	7
2.3 Měřicí jednotka SOFO V pro statická měření	7
2.3.1 Popis	7
2.3.2 Technická specifikace měřicí jednotky pro statická měření	8
2.4 Doplnkové měřicí systémy pro statická měření	9
2.4.1 Popis	9
2.4.2 Technická specifikace jednotky SOFObus-ADAM Bridge	9
2.5 Měřicí jednotka pro dynamická měření	10
2.5.1 Popis	10
2.5.2 Technická specifikace měřicí jednotky pro dynamická měření	10
3 Instalace snímačů	11
3.1 Zabudované extenzometry	12
3.2 Příložné extenzometry	12
3.3 Optické připojovací kabely	13
4 Software pro měření	14
4.1 Obecný popis systému SOFO SDB	14
4.2 Hlavní okno softwaru SOFO SBD	15
4.2.1 Hlavní panel programu SOFO SBD	16
4.2.2 Navigační panel programu SOFO SBD	17
4.3 Základní popis spuštění manuálního měření	17
4.4 Ovládání datalogeru měřicí jednotky SOFO	18
5 Metodika měření	19
5.1 Jednorázové experimenty	19
5.2 Dlouhodobé sledování konstrukce	20
Závěr	20
Literatura	20
Příloha A - Základní pojmy	21

Úvod

V rámci rozvojového projektu MŠMT ČR č.3.a (etapa 10.14) byla v roce 2008 zakoupena základní část systému SOFO pro statická měření s optovláknovými tenzometry od firmy SMARTEC S.A. ze Švýcarska. Dodavatelem byla česká firma Safibra, s.r.o. Náklady na zakoupení systému byly pokryty z dotace MŠMT ČR (63%) a z prostředků Kloknerova ústavu ČVUT (37%). Systém tvoří jednotka pro statická měření, soubor extenzometrů a jednotky ADAM 4000 od firmy Advantech, určené k připojení snímačů pro monitorování podmínek měření s extenzometry. Systém je řízen počítačem pomocí dodaného programového vybavení. Průběh řešení projektu a uvedení systému do provozu je popsáno v technické zprávě [1].

Podle informace výrobce byla technika měření vyvinuta v letech 1992-1995, v letech 1995 až 2002 byly ověřovány jeho vlastnosti na různých stavebních konstrukcích ve Švýcarsku a byl dokončen vývoj komerční verze systému. Od roku 1998 je postupně instalován na významných stavebních konstrukcích po celém světě, zejména mostech, vysokých budovách a tunelech.

Tato příručka obsahuje základní informace o dodaném systému a možnostech jeho využití pro studenty bakalářského, magisterského a doktorandského studia stavebních oborů a řešitele projektů, kteří by měli zájem toto zařízení využívat. První kapitola uvádí základní informace o vlastnostech optických vláken a možnostech jejich použití pro měření poměrných deformací nebo teplot. Jsou také zmíněny používané principy analyzátorů odraženého záření. Jsou uvedeny příklady vlastností snímačů na bázi Fabry-Perotova interferometru nebo Braggovy mřížky. Extenzometry systému SOFO jsou popsány ve druhé kapitole, ve které jsou dále popsány principy měření jednotek pro statická a dynamická měření poměrných deformací. Jsou uvedeny hlavní technické charakteristiky uvedených jednotek a je popsán způsob zapojení dalších snímačů (např. termočlánků) do měřicího systému. Základní informace pro práci s dodaným programovým vybavením jsou uvedeny v [1].

Ve třetí kapitole je popsána instalace zabudovaných a příložných extenzometrů na stavební konstrukci. Pozornost je věnována také optickým propojovacím kabelům pro jejich připojení k jednotce pro statická (popř. dynamická) měření. Čtvrtá kapitola je věnována možnostem využití zařízení SOFO v praxi. Jsou uvedeny hlavní přednosti této techniky měření a základní informace k metodice měření.

Pro zájemce o podrobnější studium jsou uvedeny základní publikace k problematice využití optických metod. Klíčové informace k metodě SOFO obsahuje [4], zpracovaná autory této techniky měření. Příklady aplikací na stavebních konstrukcích jsou uvedeny na internetových stránkách výrobce <http://www.smartec.ch>.

1 Optovláknové snímače

1.1 Optická vlákna

Optické vlákno je určitý typ optického vlnovodu, kterým je možné přenášet optické záření. Využívá se odrazu paprsků na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu nebo fokusace paprsků v prostředí s gradientním profilem indexu lomu. Záření se přenáší jádrem optického vlákna, plášť optického vlákna vytváří podmínky pro přenos záření. Přenos záření vláknem omezuje disperze, která závisí na typu vlákna, jeho průměru, délce a materiálu. Disperze se projevuje útlumem intenzity záření a změnami časového průběhu informace přenášené zářením. Energie záření se šíří vláknem mnoha módy (vidy). Pokud je příčný rozměr vlákna srovnatelný s vlnovou délkou přenášeného záření, může se optická energie šířit jen v několika málo módech (videch). Nejlepší jsou jednomódová (jednovidová) vlákna, která mají téměř nulovou disperzi.

Z hlediska jeho použití pro měření lze optická vlákna rozdělit na aktivní (snímače) a pasivní (kabely). Pasivní vlákna slouží k přenosu informace na velké vzdálenosti, změny jejich vlastností v důsledku působení vnějších vlivů jsou nežádoucí. Aktivní vlákna reagují na změnu vnějších podmínek změnou rozměrů nebo indexu lomu a tím ovlivňují vlastnosti přenášeného záření. Procházející složky záření jsou charakterizovány vlnovou délkou (resp. frekvencí), amplitudou a fází. Bez nároku na úplnost je možné metody měření rozdělit na měření změny intenzity, vlnové délky nebo fáze procházejícího nebo odraženého záření.

Nejjednodušší metodou je měření změn intenzity záření procházejícího vláknem v důsledku působení vnějšího prostředí – např. přerušení vlákna, mechanického působení sil kolmo na osu vlákna (tlak, ohyb) apod.

Výhodnější je analýza změn fáze jedné nebo více monochromatických složek záření (záření s jednou vlnovou délkou), způsobených vnějšími vlivy (nejčastěji deformace, teplota). Principy snímačů a detektorů jsou odvozeny od různých typů interferometrů (Michelsonova, Fabry–Perotova, Frizeauova nebo Mach-Zenderova) viz [2].

1.2 Interferometrické snímače se dvěma optickými vlákny

Tyto snímače jsou odvozeny z Michelsonova interferometru, který je zde realizován pomocí dvou optických vláken. Pokud se záření z monochromatického zdroje rozdělí do dvou svazků, pak záření v obou svazcích má stejnou frekvenci a stejnou počáteční fázi. Oba svazky musí být stejně dlouhé a záření musí procházet stejnými optickými prvky. Na měřicí svazek působí vyšetřovaný vliv vnějšího prostředí (teplota, deformace ve směru osy vlákna apod.), referenční svazek je proti působení těchto vlivů chráněn. Pokud vnější prostředí působí na oba svazky stejně (např.

změna teploty), je vliv prostředí při tomto uspořádání vyloučen. Po odrazech na koncích vláken se oba svazky záření spojují do jednoho svazku a dochází k interferenci, která se projeví vznikem interferenčních proužků na stínítku detektoru. Interferenční obraz je pro dané vnější podmínky stabilní. Po převedení na elektrický signál může být analyzován standardními metodami. Toto uspořádání je vhodné pro snímače deformace s velkou délkou měřicího vlákna (základnou extenzometru), které jsou základním prvkem dále popsaném systému SOFO firmy Smartec S.A.

1.3 Snímače na bázi Fabry–Perotova interferometru

Z Fabry-Perotova interferometru jsou odvozeny miniaturní snímače deformace nebo teploty. Jde o dvě planparalelní zrcadla vytvořená v optickém vlákne a oddělená dutinou. Dutina může být otevřená nebo uzavřená (trubka). V nejjednodušším případě jsou to dvě zrcadlové plochy „přerušeno“ vlákna, oddělené vzduchovou dutinou. Část záření prochází oběma zrcadly, část záření se odrazí zpět. Odražené záření obsahuje pouze ty složky, jejichž frekvence odpovídá frekvenci módů dutiny mezi zrcadly. Působením vnějšího prostředí dochází ke změně délky dutiny (tj. ke změně vzdálenosti zrcadel), což se projeví změnami frekvencí (resp. vlnových délek) složek odraženého světla. Změny vlnových délek odraženého záření mohou být detekovány vhodnými interferometry. Výhodou tohoto typu snímačů je jedno optické vlákno, jako referenční svazek slouží jeho úsek po první odraznou plochu. Jako příklad je uveden robustní optovlákonový extenzometr EFO firmy Roctest pro zalití do betonu (ocelová tyč s přírubami na koncích). Uprostřed tyče je v podélném otvoru s malým průměrem přilepen miniaturní optovlákonový snímač pro měření deformace ve směru osy trubky.

Vlastnosti extenzometru

Měřicí rozsahy (F.S.):	$\pm 1000, \pm 1500, \pm 2000, \pm 3000 \mu\text{m/m}$
Rozlišovací schopnost:	0.01% F.S.
Pracovní teplota:	-40 to +55°C
Rozměry snímače:	$\phi 12,5 \text{ mm}$, délka 70 mm
Materiál snímače	nerezavějící ocel

1.4 Snímače s Braggovou mřížkou

V případě snímačů s Braggovou mřížkou jsou míněny krátké úseky optických vláken, na kterých se periodicky mění index lomu ve směru osy vlákna. Jejich základní vlastností je odraz části přivedeného záření, jehož vlnová délka závisí na součinu indexu lomu základního vlákna a vzdálenosti mezi dvěma vrcholy Braggovy mřížky. Mřížka tedy působí jako úzkopásmová zádrž (filtr), která odráží pouze záření v okolí určité vlnové délky a záření s jinými vlnovými délkami propouští téměř beze ztrát. Její kvalita (selektivnost) závisí zejména na délce úseku s mřížkou. Pokud na vlákno s Braggovou mřížkou působí vnější prostředí (teplota, deformace), dochází ke změně vzdálenosti mezi vrcholy mřížky, a tím se mění i frekvence odražené složky záření. Změny vlnové délky odraženého záření mohou být detekovány některými typy interferometrů. Výhodou tohoto typu snímačů je jedno optické vlákno, jako referenční větev slouží jeho úsek po první odraznou plochu.

Jako příklad jsou uvedeny snímače od firmy Must (patří do skupiny SMARTEC S.A.), která nabízí např. snímač deformací, extenzometr, snímač teploty a jiné snímače. Snímače mohou být instalovány samostatně nebo jako řetěz až 6 snímačů.

Vlastnosti extenzometrů a snímačů teploty

Délka aktivní části:	0,20 m až 2m
Délka pasivní části:	1,4 m až 50 m
Měřicí rozsah:	0,5 % při zkrácení, 0,75 % při prodloužení vlákna
Standardní vlnové délky pro extenzometry:	Typ A: 1547nm, Typ B: 1557nm, Typ C: 1567nm, Typ D: 1537nm, Typ E: 1577nm, Typ F 1587nm při nezatíženém stavu
Standardní vlnové délky pro snímače teploty:	Typ A: 1522nm, Typ B: 1525nm, Typ C: 1528nm, Typ D: 1530nm, Typ E: 1519nm, Typ F 1517nm při 20°C

Rozlišovací schopnost extenzometrů/přesnost: 0,2 $\mu\text{m/m}$

Rozlišovací schopnost snímačů teploty/přesnost: 0,1 $^{\circ}\text{C}$

1.5 Distribuované měření poměrné deformace nebo teploty

Snímače s optickými vlákny mohou být spojovány paralelně nebo sériově do jednoho vlákna. Jsou vypracovány metody kódování a dekódování (multiplexing, demultiplexing), které umožňují jejich individuální monitorování pomocí časového dělení, rozdílných vlnových délek, různých koherenčních délek, frekvenční modulace signálu apod. S výhodou se využívají snímače s Braggovou mřížkou nebo snímače na bázi Fabry-Perotova interferometru. Monitorování všech snímačů probíhá paralelně. Tímto způsobem lze jednoduše měřit změny poměrných deformací nebo teplot v různých místech liniových staveb na velké vzdálenosti (plynovodů, mostů apod.).

2 Systém SOFO (Smartec S.A.)

Systém tvoří měřicí jednotka pro statická měření, měřicí jednotka pro dynamická měření, soubor extenzometrů na bázi optických vláken s dlouhou měřicí základnou, připojovací optické kabely, zařízení pro připojení kompatibilních snímačů doplňkových veličin a programové vybavení SOFO-DB. Z této nabídky má KÚ ČVUT k dispozici měřicí jednotku pro statická měření, soubor extenzometrů s připojovacími kabely, zařízení pro připojení kompatibilních snímačů a programové vybavení.

2.1 Princip měření

Zařízení systému SOFO jsou pracují na principu nízkokoherenční interferometrie (low coherence interferometry - LCI) a používají extenzometry se dvěma dlouhými standardními jednovidovými optickými vlákny.

Optické uspořádání měřicího systému pro statická měření sestává ze zdroje záření malou koherencí a dvojitého Michelsonova interferometru v tandemovém uspořádání. Dva optické svazky prvního interferometru jsou instalovány na stavební konstrukci v polyamidové hadici – jeden z nich je v kontaktu s konstrukcí (L1 - aktivní svazek), druhý je v hadici umístěn volně (L2 - referenční svazek). Referenční svazek má za úkol kompenzovat změny indexu lomu optických vláken, způsobené změnami teploty. Druhý přenosný jednovidový Michelsonův interferometr (analyzátor) má jeden svazek zakončený pohyblivým zrcadlem na počítačem řízeném mikrometrickém stolku s mikroposuvem. Jestliže délka tohoto optického svazku odpovídá rozdílu délek aktivního a referenčního svazku prvního interferometru (L1-L2), jsou detekovány interferenční proužky. Kompenzace rozdílu délek se dosahuje posunutím pohyblivého zrcadla. Vznik interference je detekován charakteristickou koherenční funkcí (tři vrcholy). Vzdálenost krajních vrcholů spektra od středového vrcholu indikuje rozdíl optických drah po kompenzaci délek pohyblivým zrcadlem.

Měřením vzdálenosti vrcholů koherenční funkce při různých pozicích zrcadla, vyvažujícího oba interferometry, lze určit deformaci aktivního vlákna. Není vyžadováno nepřetržité měření a stejná měřicí jednotka může být použita pro monitorování mnoha optických snímačů. Při měřeních je tak zachována počáteční hodnota - tzv. „absolutní nula“, definovaná okamžikem instalace extenzometru. Podrobný popis této techniky je ve [3].

Měřicí systém pro dynamická měření tvoří zdroj záření s malou koherencí, Michelsonův interferometr vytvořený aktivním a referenčním optickým vláknem extenzometrů, a demodulační systém, který analyzuje odražené světlo. Základem demodulačního systému je Mach-Zenderův interferometr s aktivním fázovým modulátorem v jednom svazku, který kompenzuje rozdíly délky aktivního a referenčního optického vlákna. Činnost modulátoru řídí digitální signální procesor (DSP). Na výstupu demodulátoru je standardní analogový signál, odpovídající časově proměnné složce odezvy, tj. změně délky vlákna (po přepočtu poměrné deformace) jako funkce času. Jeho digitalizovaná verze může být uložena v paměti jednotky nebo přenášena přes sběrnici USB 2.0 do připojeného PC. Při dynamických měřeních není zachována „absolutní „nulová“ hodnota. Dynamická měření jsou vztažena k relativní „nule“, definované okamžikem zapnutí měřicí jednotky. „Absolutní nula“ může být obnovena pomocí měřicí jednotky pro statická měření. Rozlišovací schopnost jednotky pro dynamická měření je přibližně 100x větší než při statickém měření.

2.2 Extenzometr SOFO

Extenzometr SOFO je složen ze dvou hlavních částí – aktivní a pasivní. Aktivní část (měřicí a referenční optické vlákno, optický vazební prvek) je uložena ve vyztužené polyamidové hadici. Vyrábí se ve standardních délkách 0,25 m až 10 m (na vyžádání také 10 m až 20 m). Pasivní část (připojovací optický kabel) je dodávána ve třech verzích podle požadavků na mechanickou ochranu vlákna rozlišených barvou (žluté, šedé a černé připojovací optické kabely) ve standardních délkách 1,4 m až 50 m (na vyžádání mohou být dodány delší). Připojovací kabely jsou zakončeny optickými konektory E-2000. Extenzometry nevyžadují kalibraci. V současné době máme k dispozici extenzometry v délkách 0,5 m, 1 m a 2 m. Při objednání extenzometru je třeba specifikovat délku aktivní a pasivní části v [m], typ připojovacího kabelu a požadavek na připojovací konektor (konektor pouze pro statická měření nebo pro statická i dynamická měření).

Další vlastnosti extenzometru

Měřicí rozsah:	0,5% aktivní délky při zkrácení a 1,0% při prodloužení (předpětí je standardně 0,5% aktivní délky)
Životnost:	95% - 100% po betonáži 90% - 95% po 7 letech (ověřeno) 75% - 80% po 20 letech (odhad)
Rozsah pracovních teplot:	pasivní část: -40°C až +80°C aktivní část: -50°C až +110°C (-50°C až +170 °C na vyžádání)
Pracovní tlak:	5 atp (15 atp na vyžádání)



Obr. 1 Optovláknový extenzometr – aktivní část a pasivní část s optickým konektorem.
(převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

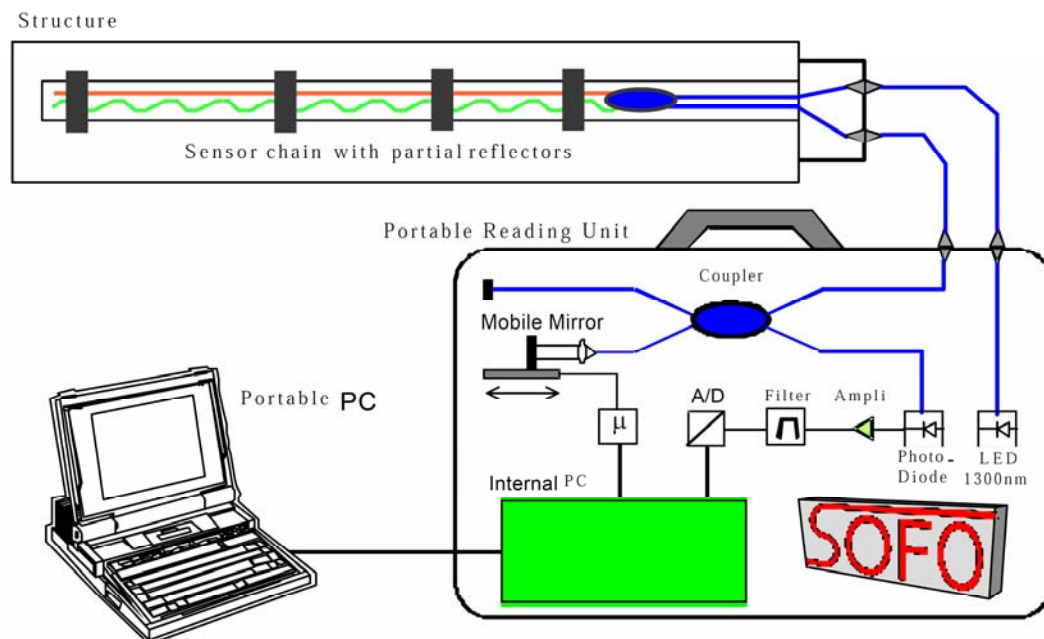
2.3 Měřicí jednotka SOFO V pro statická měření

2.3.1 Popis

Měřicí jednotka pro statická měření je dodávána ve dvou provedeních – jako robustní přenosná jednotka a v provedení pro trvalou instalaci do skříně na měřeném objektu nebo v laboratoři. Obsahuje všechny části nízkokoherenčního interferometru kromě vláken extenzometru – tj. zdroj záření, pohyblivé zrcadlo a související elektroniku. Jednotka je napájena z externího zdroje nebo z interního akumulátoru. Dodaná jednotka je vybavena interním 12 kanálovým optickým přepínačem pro extenzometry. V případě potřeby může být doplněna externími přepínači pro 32 nebo 100 kanálů. Interní a externí přepínače mohou být řazeny kaskádově až do celkového počtu

1000 kanálů. Třináctý vstup (SOFObus) je určen pro připojení zařízení ADAM pro měření doplňkových veličin. Paměť pro záznam měřených dat (datalogger) umožňuje použití měřicí jednotky nezávisle na řídicím PC pro automatické monitorování. Může být doplněna externím modemem, jehož prostřednictvím lze kontrolovat stav jednotky, provádět měření a stahovat data. Všechny funkce jsou primárně ovládány z řídicího PC pomocí dodaného programového vybavení. PC slouží také ke stahování a ukládání dat do databáze měření.

Na obr. 2 je schéma měřicí jednotky pro statická měření. Sestava měřicí jednotky, řídicího počítače a externího optického přepínače je na obr. 3.



Obr. 2 Schéma měřicího systému pro statická měření (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

2.3.2 Technická specifikace měřicí jednotky pro statická měření

Rozlišovací schopnost při měření	2 μm RMS
Linearita / Přesnost	< 2 ‰
Dynamický rozsah	max. 50 mm
Drift měření („posun nuly“)	menší než rozlišovací schopnost při měření
Kalibrace	není vyžadována
Doba měření	< 10 s
Dostupný počet kanálů	1 nebo 12 kanálů, až do 100 kanálů s oddělenou přepínací jednotkou. Přepínací jednotky mohou být zapojeny kaskádově až do 1000 kanálů
Síťové napájení	interní zdroj 230 V 50 Hz / 110 V 60 Hz
Interní akumulátor	12 VDC
Doba provozu při napájení z akumulátoru	5000 (20°C), 2500 (–10°C) při měření se záznamníkem dat > 8 hodin při komunikaci s PC
Externí konektory	RS232 nebo modem,
Extenzometry:	13 optických portů u verze s interním optickým přepínačem
Ostatní snímače:	SOFO-bus
Kapacita záznamníku dat	Typicky 20 tis. měření, (až 320 tis. měření s pamětí 64Mb)
Rozměry	~ 470 mm x 350 mm x 170 mm

Hmotnost	~ 12 kg
Rozsah pracovních teplot	-20°C až +60°C bez interního přepínače 0°C až +60°C s interním přepínačem
Rozsah skladovacích teplot	-30°C až +70°C
Vlhkost	90%, nekondenzující



Obr. 3 Měřicí zařízení s řídicím počítačem, jednotkou pro statická měření externím optickým přepínačem
(převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

2.4 Doplnkové měřicí systémy pro statická měření

2.4.1 Popis

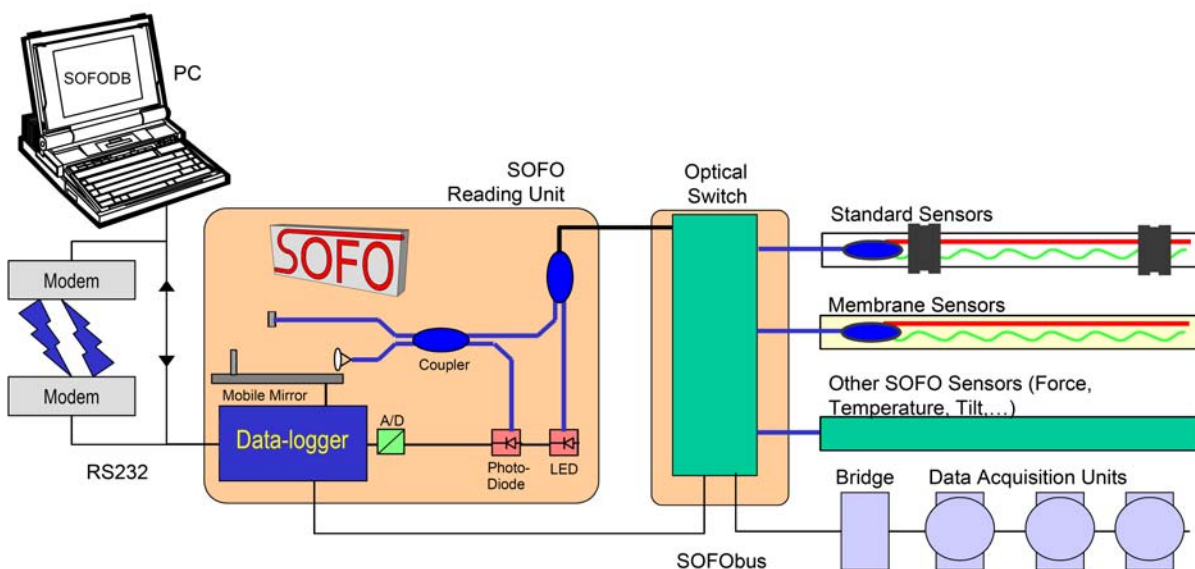
Modul „SOFObus-ADAM Bridge“ umožňuje připojení modulů ADAM řady 4000 od firmy Advantech. K měřicí jednotce pro statická měření je možné připojit několik modulů SOFObus-ADAM Bridge, ke každému z nich je možné připojit několik podporovaných modulů ADAM pomocí standardní sběrnice ADAM bus (RS485). Blokové schéma připojení jednotek ADAM ukazuje obr. 4. Snímače připojené prostřednictvím těchto modulů jsou součástí měřicího systému. Měření, ukládání naměřených dat do databáze měření, jejich zpracování, zobrazení a analýza se provádí interaktivně pomocí příkazů souboru programů SOFO DB stejně jako při měření extenzometry SOFO. Při měření bez řídicího PC jsou data ukládána do záznamníku.

Moduly ADAM se používají pro měření doplňujících veličin, nezbytných pro korektní interpretaci výsledků měření extenzometry SOFO (např. teplot v okolí extenzometrů, síl, rychlosti větru a vlhkosti). Máme k dispozici moduly ADAM 4018+ pro připojení 8 termočlánků nebo snímačů s analogovými výstupy (napětí, proud).

2.4.2 Technická specifikace jednotky SOFObus-ADAM Bridge

Rozměry	~ 70 mm x 120 mm x 35 mm (moduly ADAM) ~ 110 mm x 130 mm x 35 mm (SOFObus-ADAM Bridge)
Pracovní teplota	- 10 až +70°C
Vlhkost	5 až 95% RH

Napájení	+10 až +30 V, (jednotka SOFO V nebo externí zdroj)
Standardně podporované moduly ADAM	4017: 8-kanálový modul AI 4018: 8-kanálový modul pro termočlánky 4018M: 8-kanálový modul AI (není podporován záznamník)
Podporované (ale netestované) moduly ADAM	4510 / 4510s: opakovač 4541: Konvertor pro optické kabely 4550: Modem
Moduly ADAM podporované na vyžádání	4011 / 4011D / 4012: jednocanálový modul AI 4013: modul vstupů RTD 4016: modul tenzometrických vstupů 4052 / 4053: modul číslcových vstupů 4080 / 4080D: modul čítač/frekvence



Obr. 4 Připojení externích modulů ADAM pomocí modulů SOFObus - ADAM bridge jednotce pro statická měření (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

2.5 Měřicí jednotka pro dynamická měření

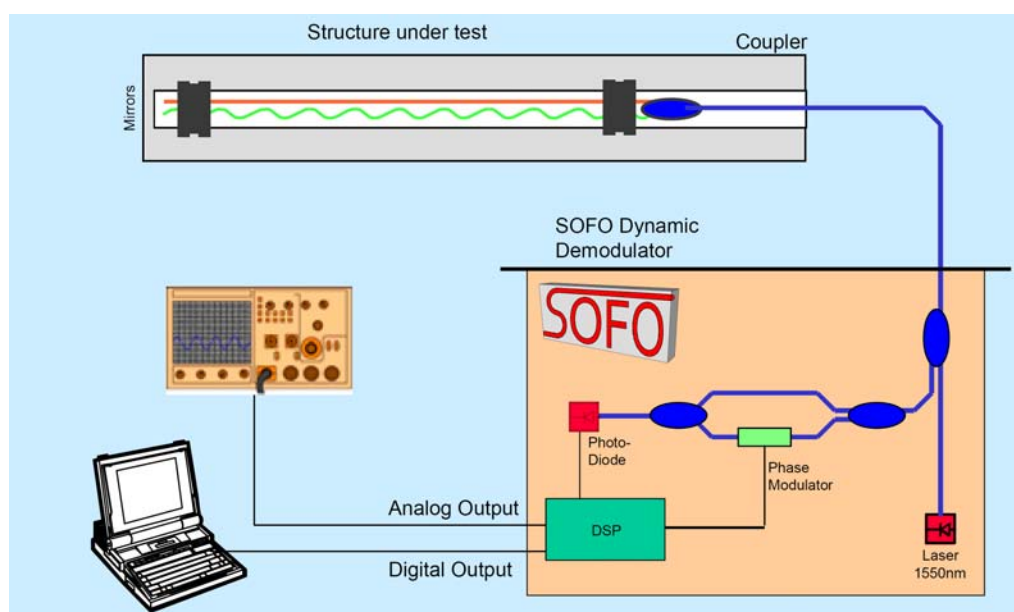
2.5.1 Popis

Systém pro dynamická měření je tvořen měřicí jednotkou pro dynamická měření a standardními extenzometry SOFO s dlouhou měřicí základnou, které jsou používány také pro statická měření – schéma je na obr. 5. Umožňuje provádět standardní dynamická měření jako jsou např. měření odezvy mostu při zatížení dopravou, větrem, seismickým zatížením nebo modální analýzu bez nebo s použitím budícího zatížení.

2.5.2 Technická specifikace měřicí jednotky pro dynamická měření

Frekvenční rozsah	0 (statická deformace) až 10 kHz
Měřicí rozsah	± 5 mm (maximální deformace)

Rychlost deformace	$\pm 10\,000\ \mu\text{m/s}$ (maximální rychlost deformace)
Maximální rozdíl drah optických svazků:	$38\ \text{mm} \pm 5\ \text{mm}$
Rozlišovací schopnost	$0,01\ \mu\text{m}$
Drift (posun nuly)	$< 0,003\ \mu\text{m/s}$ (1 h po zapnutí jednotky)
	$< 0,5\ \mu\text{m/den}$ při použití kompenzace driftu (snižuje počet kanálů na 7)
Počet kanálů	8 kanálů na modul, paralelní měření
Digitální zápis dat	USB 2.0, obnovovací frekvence do 10 kHz, 32 bitů
Analogový výstup	8 kanálů, obnovovací frekvence do 10 kHz, 20 bitů.
Napájení	interní zdroj 230 V 50 Hz / 110 V 60 Hz
Rozměry/ hmotnost	480 mm x 180 mm x 440 mm (19" skříň, 4HE) / 12 kg
Rozměry	stolní provedení (534 mm x 208 mm x 500 mm)
Pracovní teplota	0°C až $+30^{\circ}\text{C}$



Obr. 5 Schéma měřicího systému pro dynamická měření (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

3 Instalace snímačů

Obě optická vlákna extenzometru jsou uložena v plastové hadici, která je vyztužena kovovými prvky. Kovové prvky na obou koncích extenzometru zajišťují spojení mezi měřenou konstrukcí a měřicím optickým vláknem. Při narovnání hadice extenzometru dojde automaticky k vytvoření požadovaného předpětí měřicího vlákna. Referenční vlákno je v hadici volně položeno. V plastové hadici na straně připojovacího kabelu je optický vazební prvek (coupler), který zajišťuje rozdělení optického svazku (připojovací kabel) do dvou větví a současně spojení záření odraženého na konci obou větví opět do jednoho svazku.

Extenzometry mohou být zality do betonu (zabudované extenzometry) nebo mechanicky upevněny na povrch konstrukce pomocí vhodných montážních přípravků (příložné extenzometry).

3.1 Zabudované extenzometry

Na obr. 6 je fotografie tenzometru upevněného k výztuži před betonáží. Tenzometr je upevněn vně základny extenzometru pomocí plastových montážních pásek. Pro zabudování jsou vhodné černé přípojovací kabely (viz 4.3). Přenos deformace na měřicí vlákno zajišťují po zalití betonem kovové prvky na koncích extenzometru. Plastové montážní pásky lze použít i pro fixaci přípojovacího kabelu. Plastová instalační krabice se upevní na požadovaném místě na vnitřní stranu bednění. Do ní se uloží svinutý konec přípojovacího optického kabelu s konektorem. Snímač teploty se upevní v okolí středu extenzometru. Přípojovací kabel může být veden paralelně s optickým přípojovacím kabelem. Volný konec kabelu se svine a vloží do instalační krabice. Pokud je instalováno více extenzometrů a snímačů blízko sebe, je obvykle vhodné a ekonomicky výhodné vyvést všechny přípojovací kabely do jedné instalační krabice. Po odstranění bednění se krabice očistí a instalace pokračuje propojením instalační krabice s přípojovací skříní vhodnými přípojovacími kabely, vedenými po povrchu konstrukce.



Obr. 6 Optovláknový extenzometr s aktivní délkou 4 m upevněný na výztuži před betonáží
(převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

3.2 Příložné extenzometry

Příložné extenzometry se montují na konstrukci pomocí přípravků ve tvaru L. Přípravky musí umožnit narovnání extenzometru – je tedy nutné počítat s potřebou malého posunutí přípravku ve směru osy extenzometru. Přípravky se na betonové konstrukci upevňují pomocí mechanických nebo chemických kotev. Opěrnou plochu přípravku je třeba vyrovnat vhodným rychle tvrdnoucím lepidlem. U plastových konstrukcí lze přípravky montovat na přilepené příšroubované destičky. Na ocelové konstrukce lze přípravky montovat na přivažené ocelové destičky. Přístupné extenzometry je nutné mechanicky chránit kovovými kryty proti mechanickému poškození.

Není nutné zřizovat instalační krabičky. Šedé přípojovací kabely mohou být v lištách přímo vedeny do nejbližší přípojovací skříně společně s přípojovacími kabely ostatních snímačů. Snímač teploty se instaluje v okolí středu extenzometru 3 až 4 cm pod povrchem betonu. U ocelové nebo plastové konstrukce se upevní na její povrch. Snímač teploty je v tomto případě vhodné tepelně izolovat od okolního vzduchu. Ve všech případech nás zajímá teplota konstrukce. Vliv teploty vzduchu je kompenzován referenčním vláknem extenzometru. Instalaci příložného extenzometru na betonový nosník ukazuje obr. 7.



Obr. 7 Instalace příložného extenzometru na betonový nosník (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

3.3 Optické přípojovací kabely

Přípojovací kabely slouží k optickému připojení extenzometru k měřicí jednotce. Jednotlivé extenzometry budou obvykle zabetonovány do konstrukce nebo budou instalovány v různých a často velmi obtížně přístupných místech na povrchu konstrukce. Je vhodné, aby jednotlivé přípojovací kabely od extenzometrů a dalších snímačů (např. teploty) byly bezpečným způsobem a co nejkratší cestou vyvedeny na povrch konstrukce do instalačních krabiček. Tyto kabely budou jednak optické (pro extenzometry nebo optovláknová čidla teploty), jednak metalické pro snímače připojené na měřicí jednotky ADAM. Z instalačních krabiček jsou přípojovací kabely vedeny bezpečným způsobem [např. v liště] po povrchu konstrukce do přípojovací skříně. Do této skříně jsou také přivedeny přípojovací kabely od extenzometrů a snímačů instalovaných na povrchové plochy konstrukce. Na konstrukci může být jedna nebo více přípojovacích skříní, které mohou být mezi sebou propojeny sdruženými kabely (metalické a optické vícevláknové kabely) nebo oddělenými metalickými a vícevláknovými optickými kabely.

Základem pro další postup je optimalizace nákladů na celou síť přípojovacích optických kabelů, které mohou být srovnatelné s náklady na instalované snímače. Náklady závisí na počtu instalovaných extenzometrů a snímačů teploty, velikosti a typu konstrukce, přístupnosti instalačních krabiček a způsobu měření (nepřetržité, periodické nebo občasné sledování). Například při nepřetržitém sledování bude pravděpodobně nutné přivést kabely od všech snímačů na jedno pracoviště, na kterém budou snímače trvale připojeny k měřicí jednotce. Při periodickém sledování betonových konstrukcí bude třeba jedno nebo více takových pracovišť dočasně vytvořit, protože měření vyžaduje určitý čas pro posouzení vlivu teploty (např. jeden den). Postupné měření jednotlivých snímačů by celý odečet prodlužovalo a zdražovalo.

Výrobce nabízí tři typy přípojovacích kabelů s jedním jednovláknovým vláknem rozlišené barvou vnější vrstvy izolace a jeden typ sdruženého kabelu s různým počtem jednovláknových vláken. Jednovláknové optické kabely jsou jednak integrální součástí extenzometru, jednak mohou být dodány samostatně s optickými konektory na obou koncích. Kabely se liší zejména odolností proti silovému působení vnějšího prostředí. Žluté přípojovací kabely na obr. 8 jsou určeny pro měření v podmínkách laboratoří a nemají žádnou zvláštní mechanickou ochranu. Je třeba zamezit jejich mechanickému namáhání v podélném i příčném směru. Šedé standardní přípojovací kabely na obr. 9 mají ochranný plastový obal, který chrání vlákno proti UV záření a zvyšuje jeho mechanickou odolnost. Jsou určeny pro montáž na povrch konstrukce a délky do 50 m. Černé přípojovací kabely na obr. 10 se vyrábějí také v délkách do 50 m, jsou chráněny dvojitým plastovým obalem a opletením z nerezavějící oceli mezi oběma vrstvami plastu. Kabely jsou určeny zejména pro extenzometry pro zalití do betonu. Výrobce dodává extenzometry s přivařenými přípojovacími kabely požadované délky a kvality, zakončené optickým konektorem.



Obr. 8 Žlutý optický připojovací kabel (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)



Obr. 9 Šedý optický připojovací kabel (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)



Obr. 10 Černý optický připojovací kabel (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A.)

Optické kabely se dodávají s 12, 24 nebo 48 jednovidovými vlákny. Vlákna jsou zakončena na obou koncích konektory E-2000 k propojení propojovacích skříněk navzájem a k připojení kabelů k měřicím jednotám. Systém SOFO může používat připojovací kabely až 1,5 km dlouhé. Pro tento účel lze použít běžně dostupné komunikační jednovidové optické kabely s vhodným počtem vláken a dostatečnou mechanickou ochranou. Jejich instalaci může zajistit specializovaná firma s příslušným vybavením pro svařování optických vláken. Sítě optických kabelů musí být chráněny proti náhodnému mechanickému poškození. U trvalých sítí je třeba kabely ukládat do plastových lišt nebo trubek, upevněných na konstrukci. U dočasně vytvářených sítí se používají kabely s nejvyšší mechanickou odolností (černé) a jejich ochranu zajišťují vhodná technická a organizační opatření.

4 Software pro měření

Měřicí systém SOFO pro statická měření využívá software nazývaný SOFO SBD (ver. 6.3.53). V rámci projektu byl pořízen tento software, který umožňuje vlastní sběr dat, správu databáze měřených údajů a jejich převod do standardních programů, jako je např. MS Office.

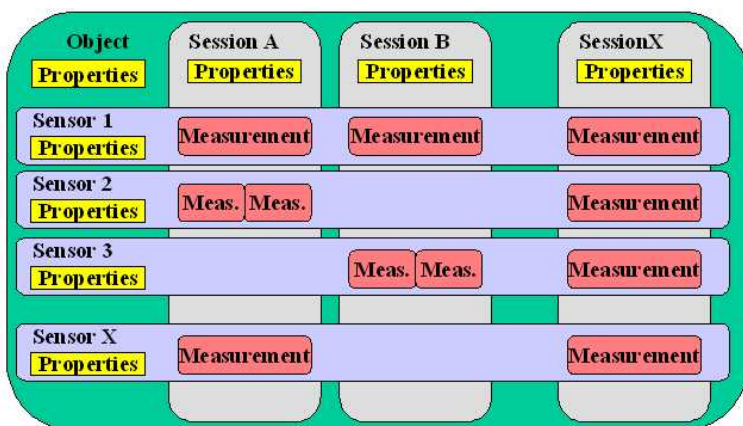
Měřicí software SOFO SBD může také obsahovat několik nadstavbových funkcí. Licence softwaru SOFO VIEW rozšiřuje základní měřicí funkce o přehlednější monitorovací prostředí s funkcemi automatického generování zpráv, jejich zasílání na e-mail, monitorování uživatelem definovaných stavů pro varování atd. Rozšiřující licence SOFO PRO umožňuje použití většího spektra předdefinovaných snímačů a použití analytických nástrojů pro vyhodnocení deformací betonu se zohledněním jeho smršťování a dotvarování (creepu). Tyto nadstavbové moduly nejsou zahrnuty v licenci KÚ, proto tyto prvky nejsou v měřicím softwaru aktivní.

4.1 Obecný popis systému SOFO SDB

Měřicí software SOFO SBD má několik funkcí:

- databáze konfigurací snímačů, které lze připojit k systému,
- správa databáze o používaných konfiguracích měření v daném projektu,
- vlastní ovládání měřicího systému SOFO pro statické měření (spuštění jednotlivého měření, spuštění periodického odečtu, nastavení datalogeru jednotky, stahování dat z jednotky),
- správa dat měření v daném projektu.

Software SOFO SBD je určitou formou databázového softwaru, která má v sobě integrované funkce pro komunikaci s měřicí jednotkou SOFO. Každé měření je ukládáno do databázového souboru s příponou *.sbd. Struktura entit této databáze je zobrazena na obr. 11. Názvy jednotlivých entit jsou použity v prvcích pro ovládání softwaru, proto je třeba uvést blíže jejich význam.



Obr. 11: Schéma struktury databáze systému SOFO SBD (převzato z materiálů firmy SMARTEC S.A)

Object – entita představující obvykle celý stavební objekt (most, přehrada, ...), který obsahuje všechny ostatní entity databáze. V jednom projektu (souboru SBD) může být definováno více entit typu **Object**.

Sensor – tato entita obsahuje informace o daném typu snímače. Snímač může obsahovat několik dalších entit typu **Channel**. Optovláknové extenzometry obsahují pouze jeden kanál, tj. jednu entitu **Channel**.

Agenda – je entita, která obsahuje konkrétní informace o nastavení měření, tj. které snímače obsažené v entitě **Object** se budou měřit, perioda odečítání dat, režim napájení při měření atd.

Session – je množina jednoho nebo většího počtu měření, které jsou uskutečněny při určitém konstrukčním stavu konstrukce nebo při určité stavební činnosti na konstrukci. Může to být např. měření před změnou statického systému, kontinuální měření při předpinání konstrukce nebo větší počet naměřených hodnot během jednoho dne po určité době provozu konstrukce. Entita **Object** obvykle obsahuje větší množství entit **Session**. Jedna entita **Session** může obsahovat jednu nebo více entit **Measurement**.

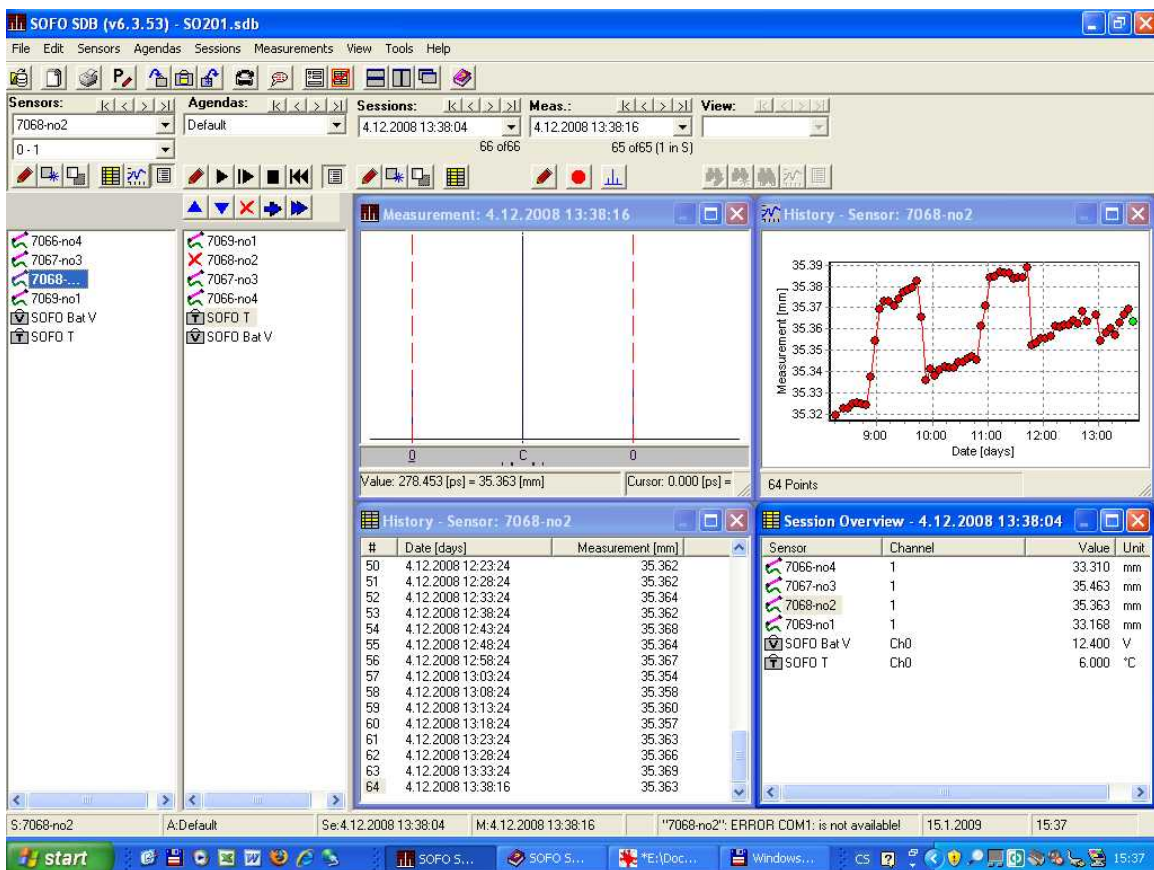
Measurement – je jedna konkrétní naměřená hodnota v daném čase.

4.2 Hlavní okno softwaru SOFO SBD

Hlavní okno softwaru SOFO SBD je zobrazeno na obr. 12. Hlavní okno obsahuje podobně jako další aplikace operačního systému Windows v horní části *hlavní panel (menu bar)*, pod kterým je *tlačítková lišta (tool bar)* pro nejdůležitější funkce z *hlavního panelu*.

Aplikace SOFO SBD dále pod *tlačítkovou lištou* obsahuje *navigační panel (navigation bar)*, který je členěný do sekcí odpovídajících jednotlivým entitám databáze SDB, tj. *Sensors*, *Agendas*, *Sessions*, *Meas.*, *View*, viz obr. 12. Sekce *View* není aktivní, protože SOFO VIEW není zahrnuto v licenci KÚ.

V pracovní ploše aplikace SOFO SBD mohou být dále spuštěna 4 okna (viz obr. 12), která se vztahují vždy k aktivní entitě **Sensor**, **Agenda**, **Session** případně **Measurement**, která je vybrána ze seznamu v rozbalovacím okně v dané sekci navigačního panelu.



Obr. 12: Hlavní okno softwaru SOFO SDB

4.2.1 Hlavní panel programu SOFO SDB

Hlavní panel nabídek obsahuje několik tlačítek:

File – funkce, pro správu databázových souborů, jako je otevření, uzavření, uložení nebo export/import dat.

Edit – obsahuje jedinou funkci *Copy (Ctrl+C)* pro uložení aktivního obsahu do schránky.

Sensors – funkce pro ovládání entit **Sensor**.

Agendas – funkce pro ovládání entit **Agenda**.

Sessions – funkce pro ovládání entit **Session**.

Measurements – funkce pro ovládání entit **Measurement**.

View – obsahuje funkce pro okna pracovní plochy aplikace. Neaktivní prvky patří nadstavbě SOFO VIEW, která není aktivována.

Tool – je skupina funkcí pro komunikaci s vlastní měřicí jednotkou SOFO, které slouží pro vlastní konfiguraci systému, kalibraci akumulátoru, resetování systému, nastavení licenčních čísel, programování datalogeru, stahování dat z datalogeru.

Help – nápověda systému SOFO SDB.

4.2.2 Navigační panel programu SOFO SBD

Navigační panel je členěný do sekcí odpovídající jednotlivým entitám databáze SDB, viz obr. 12. Aktivní entita v dané sekci je vybírána pomocí rozbalovacího okna. U entity **Sensor** je druhé rozbalovací okno určeno entitě **Channel**. Optovláknové extenzometry mají pouze jednu entitu **Channel**. Nejdůležitější ovládací tlačítka jsou:



otevře okno vlastnosti dané entity, např. vlastnosti snímače (pro nastavení typu snímače, konstanty, aktivní délky, ...) nebo vlastnosti agendy (perioda odečítání dat, počátek měření, konec měření, volba napájení z elektrické sítě nebo z akumulátoru, volba chybových hlášení atd.)



otevře okno pro nastavení nové entity, např. novou entitu **Sensor** nebo **Session**.



vypíná a zapíná zobrazení seznamu snímačů v *navigačním panelu* v sekci *Sensors* a *Agendas*, viz dva levé sloupce na obr. 12.



tlačítko v sekci *Sensors* otevře okno *History – Sensor* do pracovní plochy, kde je tabulka všech měření daného snímače nebo tlačítko v sekci *Sessions* otevře do pracovní plochy okno *Sessions Overview* kde jsou údaje naměřené ze všech snímačů dané entity **Agenda** a **Session**. Viz dolní dvě okna na obr. 12.



tlačítko otevře okno *History – Sensors* s grafem pro aktivní entitu **Sensor**. Viz okno vpravo nahoře na obr. 12.



tlačítko v pracovní ploše aplikace otevře okno *Measurement* se zakreslenými vrcholy výstupního signálu fotodiody interferometru pro zvolené měření optovláknového snímače SOFO. Viz okno vlevo nahoře na obr. 12.



tlačítka pro uspořádání pořadí snímačů v entitě **Agenda**, tlačítko pro jejich mazání z entity **Agenda** a tlačítka pro kopírování entit **Sensor** do dané entity **Agenda**.



tlačítko spouštění měření, tlačítko spouštění měření od následujícího snímače, tlačítko zastavení měření a tlačítko resetování příznaku snímače.

4.3 Základní popis spuštění manuálního měření

U nainstalovaného softwaru SOFO SDB, kde je nastavena odpovídající konfigurace měřicí jednotky SOFO lze v několika krocích zprovoznit měření podle následujícího postupu:

1. Měřicí jednotka se zapíná tlačítkem pod kontrolní diodou u madla kufříku měřicí jednotky SOFO. Tlačítko je třeba podržet několik sekund.
2. Měřicí jednotka se připojuje pomocí seriového kabelu k PC. Na jednotce SOFO je konektor označen RS232. Software v PC je nastaven pro komunikaci na sériovém portu COM1.
3. Konektory E2000/PC optických kabelů se připojí na požadovaný kanál 0 až 12. Pojistka konektoru E2000/PC má být při zapojení do panelu měřicí jednotky SOFO nahoře. Kabel lze prodloužit prodlužovacím kabelem (patchcord) a spojkou (adaptor). Nedotýkejte se ferule konektoru!
4. Spustíte program SOFO SBD na počítači.
5. Nový projekt, resp. databázový soubor, programu SOFO SDB se založí z *hlavní nabídky* tlačítky *File – New SDB database*. Zadejte jméno a umístění nového souboru. Potom se otevře okno pro definování entit **Object**. Obvykle stačí jen jedna entita tohoto typu, proto stlačíme tlačítko *OK*.

6. V navigačním panelu je v sekci *Sensors* již připraven první entita **Sensor** s názvem *Default*. Tlačítkem  nebo z hlavního panelu tlačítka *Sensors – Sensor Properties (Ctrl+F6)* lze otevřít okno nastavení vlastností snímače.
7. V záložce *General* lze editovat název snímače a přidat stručný popis.
8. V záložce *Propeties* nastavte pasivní délku optického vlákna LP a případně zaškrtněte možnost *Use high sensitivity*.
9. V záložce *Connections* lze navolit kanál měřicí jednotky SOFO. Pro kanál „0“ nesmí být zaškrtnuto *Multiplexer level 1 is in Use*. Kanály „1“ až „12“ používají interní multiplexer, proto v tomto případě zaškrtněte volbu *Multiplexer level 1 is in Use*, do editačního pole *Multiplexer level 1 Address* napište číslo 1 a do editačního pole *Multiplexer level 1 Channel* napište číslo kanálu.
10. Přidat další snímač do databáze lze tlačítkem . Jeho vlastnosti lze upravit opakováním bodů 6 až 9.
11. V navigačním panelu je již v sekci *Agendas* implicitně připravena entita **Agenda** s názvem *Default*. Do ní tlačítkem  zkopírujeme všechny nastavené snímače ze sekce *Sensors*. Tlačítkem  nebo z hlavního panelu tlačítka *Agendas – Agenda Properties (Ctrl+F5)* otevřeme okno vlastností dané agendy. V záložce *Schedule* nastavte režim měření. Zaškrtnutím volby *Active* a editováním pole *Measure every:* lze nastavit periodu odečítání v minutách. V záložce *Option* zaškrtněte volbu *Don't ask for manual connection*.
12. Tlačítkem  spustíte měření.
13. Průběh měření a jeho výsledky lze sledovat v oknech softwaru SOFO SDB, které se zobrazí automaticky nebo po stisknutí tlačítek , ,  v navigačním panelu.
14. Měření se vypne tlačítkem .
15. Data lze z okna *History – Sensors* na pracovní ploše pomocí kláves *Ctrl+C* uložit do schránky a vložit do standardních programů, jako je např. MS Office.

4.4 Ovládání datalogeru měřicí jednotky SOFO

Pro spuštění datalogeru v měřicí jednotce SOFO se předpokládá, že je již vytvořen databázový soubor SDB s entitou **Agenda**, v které je připravena konfigurace měření v režimu datalogeru. Vlastní nastavení datalogeru se provede z hlavního panelu tlačítka *Tools – Program SOFO V Data Logger*. Otevře se okno pro programování datalogeru, které je zobrazeno na obr. 13. Ve sloupci *New* lze nastavit režim měření volbou agendy ze seznamu rozbalovacího okna. Dále je třeba nastavit počátek měření, konec měření a periodou odečítání dat. Nastavení se odešle do měřicí jednotky SOFO po stisknutí tlačítka *Send Settings to SOFO*. Program se automaticky zeptá, jestli se má jednotka přepnout do režimu datalogeru.

V levém sloupečku *Current* v okně pro programování datalogeru *SOFO V Data Logging Setup*, viz obr. 13, do rubriky *Agenda* není zkopírován název agendy použité pro programování datalogeru, ale je zde vždy uveden jen počet snímačů používaných jednotkou SOFO při měření.

Režim datalogeru lze zapínat nebo vypínat z hlavního panelu tlačítka *Tools – Data Logger Mode (Ctrl+L)* nebo *Tools – Manual Mode (Ctrl+M)*.

Data z paměti měřicí jednotky SOFO se stahují z hlavního panelu volbou *Tools – Download SOFO V Data*. Otevře se okno, kde lze nastavit podrobnosti pro stahování dat. Pro běžné aplikace ze ponechat implicitní nastavení.

Paměť v jednotce SOFO lze vymazat z hlavního panelu volbou *Tools – Empty SOFO memory*.



Obr. 13: Okno pro programování datalogeru

5 Metodika měření

Optovláknové extenzometry s dlouhou základnou a výše popsané měřicí jednotky firmy Smartec S.A. představují jednu z možných technik pro statická a dynamická měření poměrných deformací na stavebních konstrukcích, která má na jedné straně řadu neoddiskutovatelných technických předností, ale na druhé straně může být při řadě jiných aplikací efektivně nahrazena jinými technikami měření. Dále uvedené informace by měly uživateli ukázat některé z možností efektivního využití této techniky.

Přednosti této techniky jsou zejména:

- možnost zachování „absolutní nuly“ při statických měřeních po dobu existence instalovaného tenzometru. „Absolutní nula“ je definovaná okamžikem instalace extenzometru – v praxi prvním odečtem měřené hodnoty po instalaci tenzometru.
- velká délka základny extenzometru;
- necitlivost na elektromagnetické pole;
- chemická stálost a odolnost;
- možnost použití pro statické i dynamické zkoušky.

Zabetonované extenzometry jsou vhodné zejména pro dlouhodobé sledování některých typů betonových konstrukcí (např. mostů, přehrad, konstrukcí s lanovými závěsy a tunelů). Kromě toho lze extenzometry instalovat jako příložné na povrch konstrukcí. To umožňuje jejich použití nejen pro již dokončené betonové konstrukce, ale i pro ocelové konstrukce nebo konstrukce z plastů.

Z časového a organizačního hlediska je tato technika vhodná zejména pro různé varianty dlouhodobého sledování konstrukcí. Lze ji však použít i při jednorázových experimentech v případech, kdy pro takové aplikace jsou závažné technické nebo ekonomické důvody.

5.1 Jednorázové experimenty

Charakteristické znaky jednorázového experimentu jsou: instalace snímačů, konečný počet na sebe navazujících měření, provedených v relativně krátkém časovém období demontáž snímačů. Typickým příkladem jednorázových experimentů jsou statické nebo dynamické zatěžovací zkoušky. Rozsah zkoušek je příslušnou normou (např. ČSN 736209). Při těchto zkouškách lze použít příložné optovláknové extenzometry, pokud je to technicky nebo ekonomicky výhodné. Pokud budou v konstrukci trvale zabudované extenzometry, určené pro dlouhodobé monitorování, bude jejich využití pro statické nebo dynamické zatěžovací zkoušky žádoucí a velmi efektivní.

Metodika zkoušek je popsána v příslušných normách a optovláknové extenzometry je možné používat jako všechny ostatní snímače.

5.2 Dlouhodobé sledování konstrukce

Vlastnosti optovláknových extenzometrů je předurčují pro dlouhodobé monitorování konstrukcí. Zejména tehdy, když v průběhu výstavby nebo používání dochází ke změnám velikosti a prostorového rozložení vnitřních sil. Takové procesy jsou typické pro např. pro betonové mosty, ale lze se s nimi setkat i u jiných typů konstrukcí. Pomocí trvale instalovaných extenzometrů lze nepřetržitě, periodicky nebo příležitostně monitorovat velikost poměrných deformací ve zvolených místech konstrukcí. Např. u mostů budou střední složky deformací charakterizovat jednak změny stálých složek zatížení, jednak změny vlastností konstrukce. Deterministické i nahodilé charakteristiky zatížení teplotou nebo dopravou sice podléhají vývoji v čase, ale tento vývoj lze kontrolovat nezávisle např. měřením teploty nebo vážením vozidel. Periodické nebo příležitostné měření časově proměnné (dynamické složky) může opakovaně přinášet podobné informace jako statické nebo dynamické zatěžovací zkoušky, které mohou být využity pro hodnocení provozního stavu konstrukcí.

Trvalé nepřetržité monitorování konstrukce vyžaduje trvalé umístění extenzometrů a měřicích jednotek na konstrukci, vybudování odpovídající optické sítě a obslužného pracoviště, případně vybudování vhodného telekomunikačního spojení s řídicím centrem. Investiční a provozní náklady jsou velmi vysoké lze je odůvodnit jen v případě strategicky významné konstrukce.

Efektivní variantou je periodické sledování. Trvale jsou na konstrukci instalovány extenzometry, které jsou připojovacími kabely svedeny do připojovacích skříní. Podle počtu a rozmístění instalovaných extenzometrů může být na konstrukci jedna nebo více připojovacích skříní. Periodicky s k nim připojuje měřicí jednotka a provede se odečet měřených veličin. Takové měření může být organizováno např. 1x ročně, optimální délka záznamu měřených veličin je 1 den (popis vlivu denního teplotního cyklu). S jednou měřicí jednotkou je tak možné monitorovat velký počet mostů. Alternativou je „nahodilé sledování“, při kterém je cyklus měření odvozen z cyklu prohlídek konstrukcí, oprav a jiných zkoušek.

Závěr

Příručka obsahuje popis optovláknových extenzometrů s dlouhou měřicí základnou a měřicích jednotek na bázi nízko-koherenčního interferometru pro statická a dynamická měření. Systém pro statická měření byl zakoupen a uveden do provozu v KÚ ČVUT z prostředků rozvojového projektu MŠMT ČR a Kloknerova ústavu ČVUT – viz [1]. Hlavní využití této relativně nové techniky měření se očekává při zkouškách a dlouhodobém monitorování stavebních konstrukcí, zejména betonových mostů.

Příručka je určena pro výuku studentů stavebních oborů a pro řešitele výzkumných projektů. Cílem je seznámit potenciální uživatele systému s možnostmi optických metod a upozornit je na některé vlastnosti systému SOFO, které lze s výhodou využít pro zkoušky a monitorování stavebních konstrukcí. Pro výuku byl připraven zkušební vzorek s instalovanými extenzometry pro zkoušky v laboratoři a jsou zpracovány návody pro laboratorní cvičení studentů všech forem studia [6].

Byl doplněn seznam aktuálních publikací k dané problematice a v příloze jsou vysvětleny některé základní pojmy, které jsou použity v textu příručky.

Literatura

- [1] Vokáč, M.: Uvedení měřicího systému SOFO do provozu. Technická zpráva. KÚ ČVUT, 2009.
- [2] Vrbová, M. a kol.: Lasery a moderní optika. Oborová encyklopedie. Prometheus, 1994. ISBN80-85849-56-9.
- [3] Measures, R.M.: Structural monitoring with fiber optic technology. Academic Press 2001. ISBN 0-12-487430-4
- [4] Glišić, B., Inaudi, D.: Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring,. John Wiley & Sons Ltd, 2007
ISBN: 978-0-470-06142-8
- [5] Materiály firmy SMARTEC S.A.
- [6] Vokáč, M., Bouška, P., Jiroutová, D.: Návody ke cvičením, KÚ ČVUT, 2009.

Příloha A - Základní pojmy

Dále uvedené termíny jsou převzaty ze starší oborové encyklopedie [1]. Některé novější termíny používané v dokumentaci k systému SOFO a v souvisících novějších publikacích [2] a [3] jsou vysvětleny na základě překladu souvisících publikací.

adaptor – prvek k propojování optovláknových konektorů.

čerp (*chirp*) mřížka s postupnou změnou délky vlny (resp. frekvence). U holografických difrakčních mřížek znamená plynulou změnu periody ve směru kolmém na linie mřížky.

dělič svazku (*beam splitter*) se používá k rozdělení svazku na dva svazky.

difrakční mřížka (*diffraction grating*) optický prvek, který má formu periodické struktury složené z velkého množství pravidelně rozložených elementů (např. vrypů, štěrbin, pruhů apod.), na kterých nastává difrakce dopadajícího záření.

distribuované měření poměrné deformace a teploty (*distributed strain and temperature sensing*) – viz text příručky.

interferometr (*interferometer*) je měřicí přístroj, který využívá interferenci vln. Interferometry se liší metodami získání koherenčních svazků a fyzikálními veličinami, které měří. Při měření teplot a poměrných deformací se používají zejména Michelsonův interferometr, Fabry-Perotův interferometr a Mach-Zenderův interferometr.

interference (*interference*) je překrytí dvou nebo více světelných svazků, při kterém dochází k superpozici (skládání) vlnění. Vzniká stacionární interferenční pole. Podmínkou stacionarity je stejná frekvence vlnění v obou (nebo ve všech) svazcích a neměnná počáteční fáze. To lze zajistit pouze vytvářením svazků dělením primárního monochromatického svazku optickým elementem, jehož poloha je stacionární (tuhá optická soustava).

interferometrie (*interferometry*) je měřicí nebo kontrolní metoda, která využívá interference optických vln k porovnávání dvou nebo více optických vlnoploch. Nejčastější metody jsou dvousvazkové. Z primárního svazku se metodou rozdělení amplitudy vytvoří dva svazky, které se po průchodu optickým systémem spojí opět do jednoho svazku. Jeden svazek je referenční, druhý je měřicí. Svazky by měly být stejně dlouhé ve vztahu ke koherenční délce, musí se opticky zpracovávat v obou svazcích stejně, nesmějí vznikat odlišné fázové průběhy. Měřený vzorek se vkládá do měřicího svazku, referenční svazek je buď prázdný, nebo obsahuje referenční vzorek. Při měření se využívá odrazu svazku na povrchu vzorku nebo průchodu svazku vzorkem. V místě dopadu obou svazků na stínítko dochází k superpozici optických vln a podle vzájemného fázového posunu obou optických vln vznikají interferenční proužky.

interferometry (*high coherence interferometers*) měřicí nebo kontrolní zařízení, která využívají interferometrie. Vycházejí z různých typů interferometrů (např. Michelsonova, Mach-Zenderova apod.). Charakteristické je použití zdrojů záření s velkou koherencí světelného svazku s frekvencí ω (laserů). Koherenční délka záření je daleko větší než předpokládaný rozdíl drah světelných svazků.

koherenční délka (*coherence length*) rozdíl drah svazku, pro který klesne viditelnost proužků pod 25%. Podle [2] je koherenční délka pro laser s vlnovou délkou 1,55 μm a šířkou pásma 10 MHz přibližně 30 m, pro jednomódovou laserovou diodu 1,55 μm a šířku čáry 50 nm je koherenční délka 48 μm .

mřížkový vlnovodný filtr (*grating waveguide filter*) mřížka, která v úzkém pásmu vlnových délek odráží zpět optické záření ve vlnovodu. Optické záření ostatních délek filtrem prochází s malým útlumem.

Nízkokoherenční interferometry (*low coherence interferometers*) jsou interferometry různých typů, používající zdroje světla s malou koherencí optického svazku (např. širokopásmový zdroj LED). Interference nastane pouze tehdy, pokud rozdíl drah měřicího a referenčního svazku je menší než koherenční délka zdroje světla. Vznik interference je podmíněn změnou délky jednoho svazku např. přemístěním zrcadla. Přemístění zrcadla je předmětem 1. fáze měření. Druhou fází představuje vyhodnocení vzdálenosti mezi vrcholy koherenční funkce pro danou polohu zrcadla.

optické vlákno (*optical fibre*) vláknový optický vlnovod, využívající odrazu paprsků (skoková změna indexu lomu) nebo fokusace (gradientní profil indexu lomu). Pro měření jsou vhodná jednomódová (jednovidová) vlákna. Základní charakteristiky jsou celkový útlum (dB/km), číselná apertura (rozmezí úhlů pro vstup paprsku do vlákna) a disperze (časový nebo frekvenční rozdíl mezi šířením osového a mimoosového paprsku).

optický kabel s konektory (*patchcord*) sloužící k propojení prvků optických tras. Vyrábí se v simplexním (jedno vlákno) nebo duplexním (dvě vlákna) provedení.

optický kabel s konektorem na jednom konci (*pigtail*) který slouží k ukončení optické trasy navařením na vlákno.

optický svazek (*optical beam*) svazek paprsků v prostoru – zde v optickém vlákně.

optický vazební prvek (*optical fiber coupler*) je prvek, který umožňuje přechod optického záření z jedné součásti do druhé. Např. ze zdroje záření do optického vlákna, rozdělení záření z jednoho optického svazku do několika větví nebo naopak sloučení dvou nebo více větví do jednoho svazku.

optovláknový extenzometr (*fiber optic extensometers*) převádí změnu vzdálenosti mezi dvěma body konstrukce na změnu délky měřicího optického vlákna. Vliv teploty je kompenzován změnou délky volného referenčního vlákna. Výsledný rozdíl změn délek obou vláken je vyhodnocen metodou nízkokoherenční interferometrie. Viz také text příručky.

optovláknové snímače s krátkou / dlouhou základnou (*interferometric short gauge-length / long gauge-length fiber optic sensors*) rozlišení optovláknových snímačů podle měřené vzdálenosti mezi body konstrukce (např. základny extenzometru). Tato vzdálenost má obvykle vliv na princip optovláknového snímače. S délkou základny roste velikost měřené změny, což je výhodné pro optovláknové extenzometry se dvěma optickými vlákny. Snímače teploty nebo extenzometry s krátkou základnou obvykle využívají princip Fabry-Perotova interferometru nebo Braggovy mřížky.

paprsek (*ray*) obecně prostorová křivka, jejíž tečna má v každém bodě směr šíření elektromagnetické energie v tomto bodě. V homogenním izotropním prostředí je paprsek přímka.

sériové nebo paralelní mnohonásobné optovláknové snímače (*serial or parallel multiplexing fiber optic sensors*) jedno optické vlákno je použito pro několik sériově nebo paralelně zapojených snímačů. Snímače jsou rozlišeny např. vlnovou délkou záření, časově nebo koherenční délkou použitého zdroje záření.

snímač s Bragovou mřížkou (*fiber Bragg grating sensor*) viz text příručky.

vlnoplocha (*wavefront*) je plocha, na které je fáze vlny v daný okamžik konstantní. V izotropním prostředí je kolmá k optickým paprskům. Vlnoplocha u rovinné vlny je rovina, vlnoplocha kulové vlny je kulová plocha.

vlnový balík (*wave packet*) vlnění, jehož amplituda je různá od nuly pouze v nevelké části prostoru.

zdroj s velkou nebo malou koherencí světelného svazku (*high or low coherence source*) Koherence je statistická charakteristika zdroje záření, která může být vyjádřena pomocí koherenční doby nebo koherenční délky (viz výše). Např. laser je typický zdroj záření s velkou koherencí; laserová dioda je zdroj záření s malou koherencí.