

## САВРЕМЕНЕ МЕТОДЕ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЈА ГРАЂЕВИНСКИХ ОБЈЕКТА

Марко Марковић<sup>1</sup>

Јован Бајић<sup>2</sup>

Тоша Нинков<sup>3</sup>

Дејан Васић<sup>4</sup>

Зоран Сушић<sup>5</sup>

Владимир Булатовић<sup>6</sup>

УДК: 624.044

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2015.103

**Резиме:** У раду је дат опис реализованог експеримента у лабораторијским условима у сврху поређења више метода детекције 1Д деформација. Као примарна, примењена је метода фибер оптичког сензора савијања (ФОСС). За поређење и калибрацију су примењене методе геометријског нивелмана и метода мерења угаоних померања инклинометром. Спроведен је статички тест и извршена је графичка и нумеричка анализа и оцена тачности појединих метода. На основу приказаних резултата примене сензора указују се нове могућности геодетске струке и имплементације нових технологија у поступку структуралног мониторинга објекта.

**Кључне речи:** Фибер оптички сензор савијања, дигитални нивелир, инклинометар.

### 1. УВОД

Мониторинг исправности конструкције, *eng: Structural Health Monitoring (SHM)*, има за циљ да даје, у сваком тренутку током животног века конструкције, дијагнозе "стања" свих саставних материјала различитих делова, и збирно, свих саставних делова који чине конструкцију као целину. Стање структуре мора да остане у пројектованом опсегу, иако се ово може у дозвољеним границама мењати

<sup>1</sup> Асистент Марко Марковић, маг. инж. геодез., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија, тел: 021 485 2198, е – mail: marko\_m@uns.ac.rs

<sup>2</sup> Асистент Јован Бајић, маг. инж. електр., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

<sup>3</sup> Ред.проф. др. Тоша Нинков, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

<sup>4</sup> Асистент Дејан Васић, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

<sup>5</sup> Доц. др. Зоран Сушић, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

<sup>6</sup> Доц. др. Владимир Булатовић, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

услед нормалног процеса старења због употребе, деловањем спољашњих утицаја, и акцидентних догађаја. [1]

*SHM* систем се састоји од сензора, система за прикупљање и пренос података, и базе података за ефикасно управљање подацима и дијагнозу исправности конструкције (укључујући обраду података, значење података, детекцију оштећења, ажурирање модела, процену безбедности и анализу поузданости). Већина академских истраживања је усмерена на развој напредних технологија детекције и сензора. [2]

Сензори имплементирани у *SHM* поред тога што прате стања структуре као што су напон, померање, убрзање прате и параметре спољашњих утицаја, као што су брзина ветра, температура и квалитет материјала структуре. [3]

Конструкције са највећим потенцијалним ризиком су нуклеарне електране, бране, морске платформе, океанске конструкције, цевоводи, мостови, зграде, авиони, железнице, ветроелектране, лопатице у турбинама, музеји, споменици итд. Практично, свака конструкција у употреби би требало да буде под неком врстом надзора: сталног, краткорочног или дугорочног, локалног или глобалног итд. [4]

Истежање материјала и деформације савијања су функционално повезане величине и једна величина се обично може извести из друге. Истежање материјала може да се мери разним уређајима, док су сензори за мерење савијања знатно мање заступљени. Технике помака таласне дужине и светлосне интерферометрије се могу користити за мерење деформација савијања али ови системи су сложени и захтевају скупе спектрометре. Са увођењем ФОСС мерење деформације савијања структуре постало је лакше и практичније. У зависности од механичке конфигурације ФОСС, многе физичке величине, као што су истежање, торзија, позиција, могу се израчунати на основу мерења савијања. [5]

Мерне траке се често користе за мерење притиска или истежања површине структуре, а затим се савијање може добити кроз функционалну везу између притиска, истежања и савијања. Међутим, мерне траке се не могу користити за мерење већих деформација савијања јер се неће вратити у њихов првобитни облик након истежања. [6]

Предности ФОСС су имуност на електромагнетне сметње, отпорност на корозију, мале димензије, висока осетљивост и велики пропусни опсег. Фибер оптички сензори могу да се примене за мерење многих физичких величина, као што су напон, истежање, температура, акустични таласи, итд. [7]

У последњих неколико година за мерење деформација савијања користе се оптичка влакна са Браговом решетком (*FBG*) и дуго-периодичном решетком (*LPG*). Ови високо прецизни и комплексни системи захтевају скупе светлосне изворе и анализаторе спектра као сложене процесе обраде података. Такође, не могу разликовати позитивно савијање од негативног. Поред тога, на њихову тачност утичу спољашњи утицаји, као што је температура тако да је њихова практична примена ограничена.

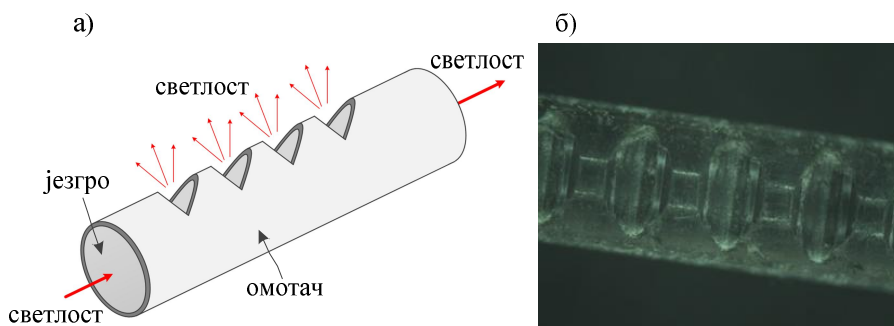
Циљ истраживања је да се на основу познатих и широко применљивих метода мерења 1Д деформација као што су: метода геометријског нивелмана и мерења угаоних померања инклинометрима изврши поређење са иновативном методом мерења ФОСС која ће бити детаљније изложена у даљем тексту. Експеримент је

реализован на конструкцији прилагођеној за имплементацију свих претходно наведених метода мерења.

## 2. ПРИНЦИП РАДА

У оптичким влакнима са степ-индекс профилом индекса преламања, светлосни зраци путују дуж цик-цак путања, тотално рефлексовани на раздвојној површини језгра и омотача. На месту савијања (деформације) оптичког влакна светлост продире у омотач и даље у околну средину, односно крајњи резултат савијања оптичког влакна је смањење интензитета светлости на излазу из истог.

Док је описана појава непожељна приликом употребе оптичког влакна за пренос информације, може се искористити за сензорске примене. Међутим, значајнија промена интензитета јавља се тек при релативно малим полупречницима савијања оптичког влакна. Осетљивост оптичког влакна на савијање може се повећати nanoшењем различитих врста структуралних несавршености на површину оптичког влакна [8] и [13]. Управо на овом принципу заснива се рад ФОСС.



Слика 1. Фибер оптички сензор савијања (ФОСС)

У случају поменутог сензора на површину оптичког влакна нанесен је одређени број зареза. Део светлосних зрака напушта оптичко влакно на месту зареза (Слика 1а). Приликом савијања оптичког влакна када се зарези налазе на конвексној страни долази до повећања ефективне ширине зареза али и до конверзије модова. Услед ова два ефекта долази до повећања броја светлосних зрака који напуштају влакно у односу на случај када је влакно исправљено, односно долази до смањења интензитета светлости која се простире кроз влакно. Уобичајено се овај случај назива позитивно савијање. У случају негативног савијања зарези се налазе на конкавној страни и тада долази до смањења ефективне ширине зареза. Другим речима, за разлику од претходног случаја смањује се број светлосних зрака који напуштају влакно, односно долази до пораста интензитета светлости која се простире кроз оптичко влакно у односу на случај када је исто исправљено. Дакле, nanoшењем зареза на оптичком влакну добија се поред повећања осетљивости оптичког влакна на савијање и могућност одређивања смера савијања (позитивно

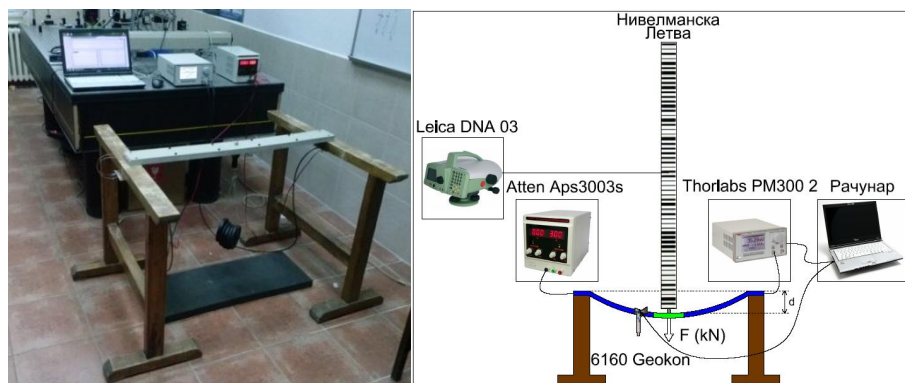
или негативно). Анализа рада сензора конструисаног на овакав начин детаљније је обрађена у радовима [8] и [13].

За потребе овог рада коришћено је пластично оптичко влакно (*PMMA*) пречника 1.5 mm. Пластична оптичка влакна су изабрана пре свега због своје робусности и ниске цене као и једноставног наношења зареза на површину влакна. Зареци су нанесени помоћу прецизног алата за резање машине *Protomat S100*, произвођача *LPKF Laser & Electronics AG*. Нанесено је укупно 50 зареза на међусобно растојању од 1 mm и дубине 0.1 mm (Слика 1б).

Слични експерименти као експеримент који ће бити детаљније објашњен у даљем тексту рада су спроведени у [8, 10, 11] док је анализа осетљивости ФОСС приказана у [5, 7, 9, 12].

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА

ФОСС уграђен је у греду од АБС пластике димензија 100 cm x 9 cm x 3 cm. Грета је са оба краја круто фиксирана за два дрвена ослонца као што је приказано на слици 2. На средини распона греде уграђена је челична инсталација. Једна страна челичне инсталације представља нивелмански репер на који се поставља нивелманска летва при мерењу методом геометријског нивелмана а друга страна представља куку на коју се качи терет. Без обзира да ли је грета постављена тако да је ФОСС на горњој или доњој страни греде, челична инсталација има могућност монтирања тако да нивелмански репер увек буде са горње а кука са доње стране. Инклинометар је круто причвршћен за греду на растојању од 10 cm од средине распона греде и постављен је у вертикалан положај пре почетка мерења (неоптерећена грета).



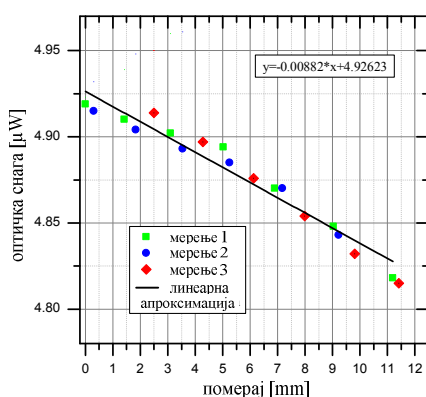
Слика 2. Експериментална поставка

Мерења методом геометријског нивелмана спроведена су дигиталним нивелиром *Leica DNA03* резолуције мерења од 0.01 mm. Угаона померања регистрована су инклинометром *Geokon 6160* са опсегом мерења од  $\pm 15^\circ$  и резолуцијом од  $\pm 0.01\text{mm/m}$  ( $\pm 2$  лучне секунде). ФОСС је са једне стране повезан на извор

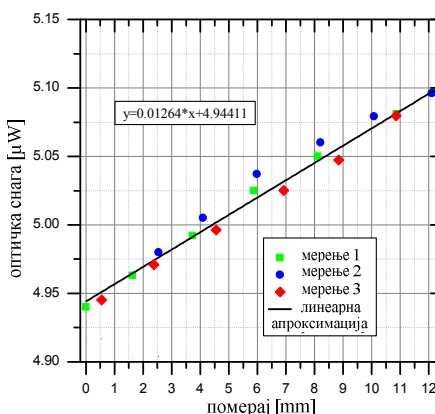
светлости (*LED* диоде), а са друге стране на детектор светлости (фотодиоде). Извор светлости је повезан са напајањем *Atten aps3003s*, док су вредности интензитета светлости очитаване детектором помоћу инструмента *Thorlabs PM300* који је директно повезан са рачунаром. На тај начин су обезбеђена очитавања интензитета светлости у реалном времену. Истовремено су вршена читања мерења ФОСС, нивелира и инклинометра. Прво мерење је реализовано без оптерећења греде, док је у сваком наредном мерењу оптерећење греде увећавано за масу од  $10 \text{ lbs} \approx 4.5359237 \text{ kg}$ . Мерења су реализована независно са 7 различитих вредности масе оптерећења.

#### 4. РЕЗУЛТАТИ

На графицима на сликама 3 и 4 приказан је одзив ФОСС у зависности од величине 1Д деформације греде. Померај изражен у mm одређен је методом геометријског нивелмана, док је одзив ФОСС изражен у  $\mu\text{W}$  оптичке снаге. На графику на слици 3 приказан је случај позитивног савијања сензора, док су на слици 4 илустровани резултати мерења у случају негативног савијања. Добијена је линеарна преносна карактеристика (уједно и најпожељнија карактеристика сензора) у оба случаја. Такође, мерења су изведена у неколико серија, док су на сликама приказани резултати мерења у три независне серије. Као што се може приметити релативно добра поновљивост добијена је и у случају позитивног и у случају негативног савијања. Треба напоменути да је приликом мерења коришћена пластична а не еластична греда па су услед деформација греде добијене различите вредности како у очитавању помераја тако и у очитавању оптичке снаге при истом оптерећењу. Такође, може се приметити да су добијени различити нагиби преносних карактеристика у случају позитивног и негативног савијања.



Слика 3. Позитивно савијање ФОСС

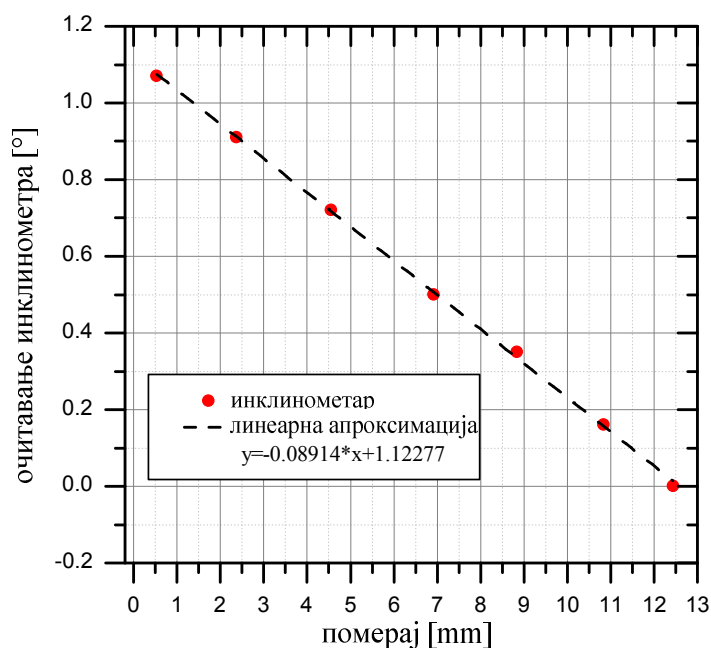


Слика 4. Негативно савијање ФОСС

Ова разлика, последица је пре свега броја, дубине и распореда зареза као и несавршености саме израде истих. Додатно, приликом позитивног савијања ФОСС монтиран је на горњој површини греде, док је приликом негативног савијања сензор монтиран на доњој површини греде.

На графику на слици број 5 приказан је одзив инклинометра изражен у степенима [°] у зависности од величине 1Д деформације греде изражене у mm измерене дигиталним нивелиром.

Као и у случају ФОСС добијен је линеаран одзив. Поред угаоног померања услед деформације греде сам инклонометар био је изложен и положајном померању па из тог разлога анализа и интерпретација резултата није детаљно спроведена.



Слика 5. Одзив инклинометра

## 5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљен је једноставан систем, ниске цене за праћење деформација грађевинских и индустријских структура применом ФОСС. Применом методе геометријског нивелмана и на основу очитавања ФОСС формирана је преносна карактеристика сензора која приказује међусобну зависност деформације греде изражене у mm и одзива ФОСС у  $\mu\text{W}$  оптичке снаге. Током изведених експеримената уочено је да током времена услед промене температуре и загревања електронских (отпорника) и оптоелектронских

компоненти (*LED* диоде и фотодиоде) долази и до промене одзива целокупног система са ФОСС. На основу мерења стабилности одзива ФОСС током времена и применом добијене преносне карактеристике утврђена је резолуција мерења од око 0.1 mm. Мерења инклинометром су извршена само у једној серији, те у циљу бољег поређења са осталим резултатима неопходно је урадити мерења у више мерних серија и треба у обзир узети чињеницу да је у експерименту коришћена греда од АБС пластике коју карактеришу пластичне деформације.

У циљу повећања стабилности и поновљивости целокупног система потребно је пажљивије пројектовати и реализовати експеримент.

## ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је резултат истраживања на истраживачком пројекту департамана за грађевинарство и геодезију (ДГГ) Факултета Техничких Наука у Новом Саду за 2015. годину: "Развој и примена савремених поступака за пројектовање, грађење и одржавање грађевинских објеката", као и пројекта „Оптоелектронски нанодимензиони системи – пут ка примени” ИИИ45003.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Balageas, D., Fritzen, C.-P. and Güemes, A.: *Structural Health Monitoring*, Hermes Science Publishing, London, UK, **2006.**, стр. 13 – 39
- [2] Ou, J.P., Li, H.: Structural Health Monitoring in mainland China: Review and Future Trends. *Structural Health Monitoring*, **2010.**, vol. 9, бр. 3, стр. 219-231.
- [3] Li, H.-N., Li, D.-S. and Song, G.-B.: Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, **2004.**, vol. 26, бр. 11, стр. 1647-1657.
- [4] Ђиновић, Z., Томић, M.: Tehnologija monitoringa teških struktura pomoću fiber-optičkih senzora. *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, **2012.**, vol. 18, бр. 3, стр. 63-71.
- [5] Fu, Y. and Di, H.: Fiber-optic curvature sensor with optimized sensitive zone, *Optics & Laser Technology*, **2011.**, vol. 43, бр. 3, стр. 586-591.
- [6] Di, H.: Space curve fitting method based on fiber-optic curvature gages intensity modulation, *Optics & Laser Technology*, **2012.**, vol. 44, бр. 1, стр. 290-294.
- [7] Kovačević, M., Djordjević, A. and Nikezić, D.: An Analytical Approach and Optimization of Curvature Gauge. *Journal of Physics*. **2006.**, International Symposium on Instrumentation Science and Technology: Conference Series 48, стр. 850-858.
- [8] Babchenko, A. and Maryles, J.: A sensing element based on 3D imperfected polymer optical fibre, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **2007.**, vol. 9, бр. 1, стр. 1-5.
- [9] Arifin, A., Hatta, A. M., Muntini, M. S., & Rubiyanto, A.: Bent of plastic optical fiber with structural imperfections for displacement sensor. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, **2014.**, vol. 52, бр. 8, стр. 520-524.

- [10] Kuang, K.S.C., Akmaluddin, Cantwell, W.J. and Thomas, C.: Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors. *Measurement Science and Tehnology*, **2003.**, vol. 14, бр. 2, стр. 205-216.
- [11] Kuang, K.S.C., Cantwell, W.J. and Scully, P.J.: An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements. *Measurement Science and Tehnology*, **2003.**, vol. 13, бр. 10, стр. 1523-1534.
- [12] Song, H., Gong, H., Ni, K. and Dong, X.: All fiber curvature sensor based on modal interferometer with waist enlarge splicing. *Sensors and Actuators A: Physical*, **2013.**, vol. 203, стр. 103-106.
- [13] Babchenko, A., Weinberger, Z., Itzkovich, N. and Maryles, J.: Plastic optical fibre with structural imperfections as a displacement sensor. *Measurement Science and Tehnology*, **2006.**, vol. 17, бр. 5, стр. 1157-1161.

## MODERN METHODS OF DEFORMATIONS MONITORING OF BUILDINGS

**Summary:** *In this paper, the realized experiment in the laboratory in order to compare several methods of detection 1D deformation. As the primary method is applied fiber optic curvature sensor. For comparison and calibration methods are applied geometric leveling and method of measurement of angular displacement with inclinometer. Completed the static test and realized graphical and numerical analysis and assessment of the accuracy of individual methods. Based on the results of the application of sensor suggest new possibilities of geodetic profession and the implementation of new technologies in the process of structural monitoring facilities.*

**Keywords:** *fiber optic curvature sensor, digital level, inclinometer.*