



Andrej Jaroševič – Milan Chandoga

Tridsaťtri rokov EM metódy merania napätosti v predpínacej výstuži

Thirty-three years of the EM method for measuring stress in pre-stressed tendons

Súvis medzi mechanickým namáhaním feromagnetických prvkov a ich magnetickými vlastnosťami (inverzná magnetostrikcia alebo magnetoelasticita) objavil už v roku 1864 Villari. Začiatkom 80. rokov minulého storočia vyvinula firma Bekaert prvé magnetoelastické snímače sily v predpínacej výstuži Tensiomag. Výsledky zrejme neboli uspokojivé a k ich praktickej aplikácii nedošlo. Aplikácii tejto metódy sa začali venovať autori tohto príspevku už v roku 1984. Od roku 1990 prebiehal vývoj EM metódy, konštrukcie meracej aparatury a snímačov vo firme Projstar-PK, s. r. o. V rámci medzinárodnej vedeckovo-skupinnej spolupráce firmy s partnermi z VB, USA, SRN, Číny, Španielska a Japonska bola táto technológia aplikovaná na viacerých mostoch v zahraničí.

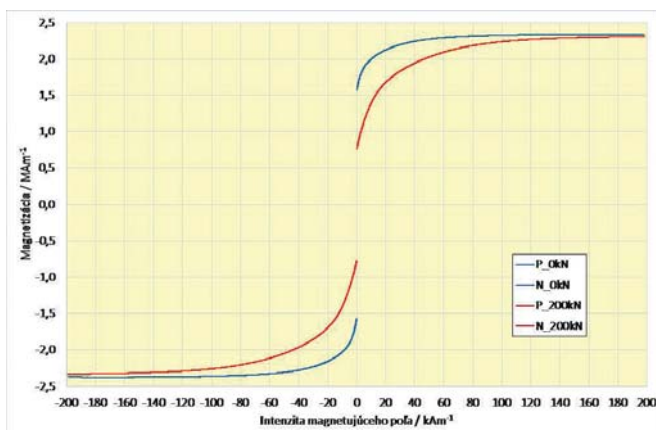
Magnetizácia feromagnetického materiálu (magnetický moment jednotkového objemu) závisí aj od vnútorného mechanického napätia, spôsobeného najčastejšie mechanickým namáhaním materiálu ťahom alebo tlakom. Nasýtená magnetizácia je základnou magnetickou charakteristikou feromagnetického materiálu, nezávisí od teploty ani mechanického napätia (všetky domény v materiáli sú orientované v smere silného magnetujúceho poľa). Je „pevným“ referenčným bodom materiálu. Ak poznáme hystereznú slučku feromagnetického materiálu (obr. 1), môžeme zistiť veľkosť mechanického napätia v materiáli. Na tento účel sa používa EM snímač, ktorý sa najčastejšie voľne na-

The connection between the mechanical stress of ferromagnetic elements and their magnetic properties (inverse magnetostriction or magneto-elasticity) was discovered in 1864 by Villari. In the early 1980s, Bekaert company developed the first magnetoelastic force sensors in the pre-stressed tendons Tensiomag. The results were probably not satisfactory and their practical application did not occur. The authors of this paper commenced to explore the application of this method back in 1984. Since 1990, the development of EM methods, construction of measuring instruments and sensors has been carried out by the company of Projstar-PK, s. r. o. In the framework of international scientific research collaboration with partners from the UK, the USA, Germany, China, Spain and Japan, this technology has been applied to several bridges abroad.

Magnetisation of the ferromagnetic material (the magnetic moment of the unit volume) also depends on the internal mechanical stress caused by the most frequent mechanical tension of the material by pulling or pressing. Saturated magnetization is the basic magnetic characteristic of a ferromagnetic material, regardless of temperature or mechanical stress (all domains in the material are oriented in the direction of a strong magnetic field). It is a reference point for the material. If we know the hysteresis loop of ferromagnetic material (Fig. 1) we can determine the magnitude of the mechanical stress in the material. For this purpose, an EM sensor is used that is loosely slipped over or attached to the material. A magnetic circuit is produced, the properties of which will vary along with the change of mechanical tension and temperature of the measured material. An appropriate physical measurement method is used to measure the properties of the magnetic circuit.

It looks simple and tempting. Ever since the precast concrete has been used in construction engineering (Eugene Freyssinet, 1928), there has been a need to measure the tensile force in the pre-stressing tendons, which must provide a permanent pressure reserve inside the concrete. Using the EM sensor, it is possible to measure the force in bonded, un-bonded and external pre-stressing tendons without any physical contact, even though a thin-walled steel tube (cable duct), HDPE pipe, plastic anti-corrosion protection or a mono-strand type plastic pipe.

Obviously, the laboratory measurement methods had to be adapted for use under industrial conditions. We have been dealing with this issue since 1984. During this period, construction of the first suspended bridges (the bridge over the river Labe in the town of Poděbrady and the bridge over the pond Jordan in the town of Tábor) and the first bridges with external pre-stressing tendons (the V1-450 Bridge and the Lafranconi bridge in Bratislava) commenced. At



Obr. 1 Zmena tvaru hystereznej slučky magnetizácie predpínacieho lana Ls 15,7 pri mechanickom namáhaní ťahom. Sile 200 kN zodpovedá napätie 1 333 MPa.
Fig. 1 Changing the shape of the hysteresis loop of the pre-stressed tendon magnetization of Ls 15.7 at the application of mechanical tension. Force of 200 kN corresponds to tension of 1 333 MPa.

sunie na materiál alebo sa priloží k materiálu. Vznikne magnetický obvod, ktorého vlastnosti sa budú meniť pri zmene mechanického namáhania a teploty meraného materiálu. Na meranie vlastností magnetického obvodu sa použije vhodná fyzikálna metóda.

Vyzerá to jednoducho a lákavo. Odkedy sa v stavebníctve používa predpätý betón (Eugène Freyssinet, 1928), vznikla potreba merať ťahovú silu v predpínacej výstuži, ktorá musí zabezpečiť trvalú tlakovú rezervu v betóne. Pomocou EM snímača možno merať bezkontaktnú silu v súdržných, nesúdržných a externých predpínacích kábloch, a to dokonca aj cez tenkostennú oceľovú rúru (káblový kanálik), HDPE rúru, plastovú protikoróznú ochranu alebo plastovú rúru lán typu monostrand.

Samozrejme, laboratórne meracie metódy bolo potrebné upraviť na použitie v priemyselných podmienkach. Tejto problematike sme sa začali venovať v roku 1984. V tomto období sa v ČSFR začali budovať prvé zavesené mosty (most cez Labe pri Poděbradoch a most cez rybník Jordán v Tábore) a prvé mosty s voľnými predpínacími káblami (most V1-450 a Most Lafranconi v Bratislave). Zároveň prebiehala výstavba jadrovej elektrárne Temelín s predpätými betónovými obálkami reaktorov.

Po prvých laboratórnych skúškach, vývoji meracej aparatury a EM snímačov sa metóda začala od roku 1986 využívať v stavebnej praxi. Súčasne prebiehal jej ďalší vývoj, inšpirovaný potrebami praxe. Od roku 1990 prevzala na seba nosnú úlohu v rozvoji EM technológie a jej aplikácii v praxi firma Projstar-PK, s. r. o.

V rokoch 1990 až 2017 sa prostredníctvom tejto firmy realizovala viac ako stovka projektov EM meraní doma aj v zahraničí (obr. 2).

V rokoch 2014 až 2015 došlo k dohode o odkúpení duševného vlastníctva (know-how), materiálu a zariadení EM systému PSS (Projstar Smart Sensor) firmou INSET, s. r. o., ktorá v súčasnosti zabezpečuje aj ďalší výskum a vývoj.

Vývoj aplikácií EM metódy merania síl v predpínacej výstuži

Problematika, ktorá bola predmetom vývoja snímačov a metodiky merania, sa týkala najmä:

- kontroly vnesenia predpínacej sily a distribúcie sily medzi jednotlivé láná predpínacieho kábla,
- kontroly distribúcie predpínacej sily po dĺžke kábla (strata pri zankotvení a strata trením v zakrivení),
- dlhodobého sledovania zmien sily v predpínacej výstuži (reológia betónu),
- dlhodobého sledovania životnosti predpätia (korózia, poškodenie, redistribúcia...) a možnosti monitorovať aj jestvujúce predpätie (dodatočne navinuté snímače),
- monitoringu predpínacej sily pri experimentálnom výskume,
- merania dynamického namáhania predpínacej výstuže, najmä závesov mostov.

Pri štandardných predpínacích systémoch sa otázka spoľahlivosti vnesenia predpínacej sily a jej strát rieši v certifikačnej procedúre. Použitie EM monitoringu tu plní len funkciu kontroly kvality vykonávaných prác. Pri súdržnom predpätí registrujú snímače po zainjektovaní kábla iba zmeny napätosti v lokálnom mieste betónovej konštrukcie, ale dajú sa využiť na meranie lokálneho dynamického namáhania výstuže.

Pri nesúdržnom predpätí, ako sú voľné káble a závesy zavesených mostov, umožňujú EM snímače monitoring ťahovej sily v štádiu napínania káblov a neobmedzene počas celej životnosti konštrukcie. Osobitne cenným monitorovacím prostriedkom sú EM snímače pri zosilňovaní betónových mostov. Monitorovateľné predpätie tu plní funkciu senzora, ktorý zachytí prípadný zhoršujúci sa stav pôvodného predpätia.

Na kontrolu distribúcie sily medzi jednotlivé láná predpínacieho kábla sme vyvinuli multilánové snímače, ktoré sú buď súčasťou napínacieho zariadenia, alebo kotvenia kábla (obr. 3 a 4).



Obr. 2 Delený EM snímač, dodatočne navinutý na záves mosta Ashidagawa, Japonsko; spolupráca s firmou Keisoku Research Consultants, Hiroshima, rok 2002
Fig. 2 Divided EM sensor, additionally wound on a cable stay system of the Ashidagawa bridge, Japan; collaboration with Keisoku Research Consultants, Hiroshima, 2002

the same time, the Temelín nuclear power plant was under construction with the pre-stressed concrete reactor containments.

Since 1986, after carrying out the first laboratory tests and the development of the measuring instrument and EM sensors, the method has begun to be used in construction practice. At the same time, its further development has been going on, inspired by the needs of practice. Since 1990, the leading role in the development of EM technology and its practical applications has been taken over by Projstar-PK, s. r. o. From 1990 to 2017 Projstar-PK, s. r. o. carried out more than one hundred EM projects measured at home and abroad (Fig. 2).

In 2014 – 2015 there was an agreement to buy intellectual property (know-how), material and equipment of the PSS system (Projstar Smart Sensor) by the company of INSET, s. r. o. which is currently performing additional research and development.

Development of the EM method application for measurement of forces inside the pre-stressed tendons

The subject of sensor and measurement methodology development, concerned in particular:

- control of the pre-stressing force input and the distribution of force between the individual wires of the pre-stressing tendon,
- control of distribution of the pre-stressing force throughout the length of the tendon (the loss by anchoring and the loss by curvature friction),
- long-term monitoring of changes in force within the pre-stressing tendons (concrete rheology),
- long-term monitoring of lifespan (corrosion, damage, redistribution...) and the possibility of monitoring the existing pre-stress of tendons (additionally wound sensors),
- monitoring of the pre-stressing force in an experimental research
- measuring the dynamic tension of the pre-stressed tendons, in particular the cable stay strands of the bridges.

Concerning the standard pre-stressing systems, the question of the reliability of the pre-stressing force insertion and its loss is addressed in the certification procedure. Here the use of the EM monitoring serves only to check the quality of works performed. In terms of the bonded pre-stressing of the grouted-in tendon, the sensors record only the stress changes locally in the given spot of the concrete structure, although they can be used to measure the local dynamic tension of tendons.

In terms of the un-bonded pre-stressing such as external tendons and stay cables of cable stayed bridges, the EM sensors are able to monitor the tensile force at the time of pre-stressing as well as un-

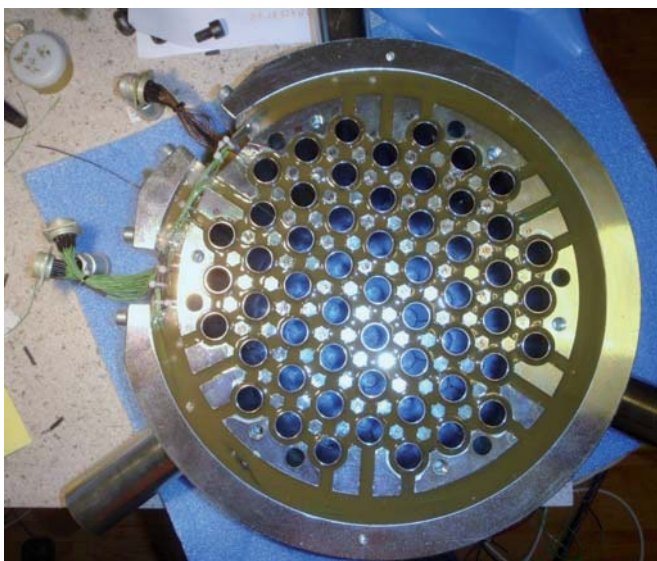


Obr. 3 Použitie jednonanových EM snímačov na meranie distribúcie sily medzi jednotlivé láná kábľa a ich náhrada multilanovým snímačom, ktorý je súčasťou kotvenia kábľa.
 Fig. 3 Use of the single-strand EM sensors for measuring the distribution of force between the individual strands of the tendon and their replacement by a multi-strand sensor, which is a part of tendon anchorage.

Vývoj meracej aparatury a snímačov

Vývoj vždy pružne reagoval na potreby praxe aj na stav elektroniky a výpočtovej techniky v danom období. Prvá počítačom riadená aparatura sa použila v roku 1994 na meranie sily v predpínacích kábľoch obálok reaktorov jadrovej elektrárne Temelín v Českej republike. Prvá impulzná aparatura riadená mikroprocesorom sa použila na mostoch Jiangyin a Nanjing cez rieku Yangtze v Číne. V aparaturách sa nepoužívali komerčne vyrábané diely, čo bolo náročné na vývoj aj výrobu.

Firma Inset vyvíja od roku 2015 novú generáciu EM meracieho systému, ktorého základným prvkom je priemyselná meracia karta (DAQ), doplnená nevyhnutnými (väčšinou jednoduchými) obvody. Riadiaci počítač ovláda pomocou LabVIEW VI aplikácií celý proces merania a vyhodnocovania, čo umožňuje pružne prispôsobiť konfiguráciu meracieho systému konkrétnym potrebám zákazníka. Diaľkové ovládanie a prenos dát cez internet sú samozrejmosťou. Na obr. 5 je porovnanie meracej aparatury Dynamag NT408 (Projstar, 2004) s prototypom meracej aparatury Triomag_8S (Inset, 2018). Na riadenie a zber dát je v aparatúre použitá DAQ NI USB 6001/2 OEM. Súčasná meracia aparatura predstavuje sofistikovaný merací prístroj, ktorý možno metrologicky overiť. Všetky meracie aparatury sú navzájom zameniteľné a dokážu merať statické aj dynamické namáhanie meraného prvku tým istým EM snímačom novej generácie.



Obr. 4 Multilanový snímač pre 55 lán určený na zabudovanie do predpínacieho lisu PAUL TENSA. Snímač bol vyvinutý pre firmu DSI, Unterschleissheim, Nemecko.
 Fig. 4 Multi-strand sensor designed for 55 strands and intended for installation into the pre-stressing machine PAUL TENSA. The sensor was developed for the company DSI, Unterschleissheim, Germany.

restrictedly throughout the lifespan of the structure. The EM sensors are especially valuable monitoring device for strengthening the concrete bridges. Here the monitored pre-stress behaves as a sensor that captures any deterioration of the original pre-stress.

We have developed multi-strand sensors that are either a part of the pre-stressing device or the tendon anchorage (Fig. 3, 4) to control the distribution of the force between the individual pre-stressing strands of the tendon.

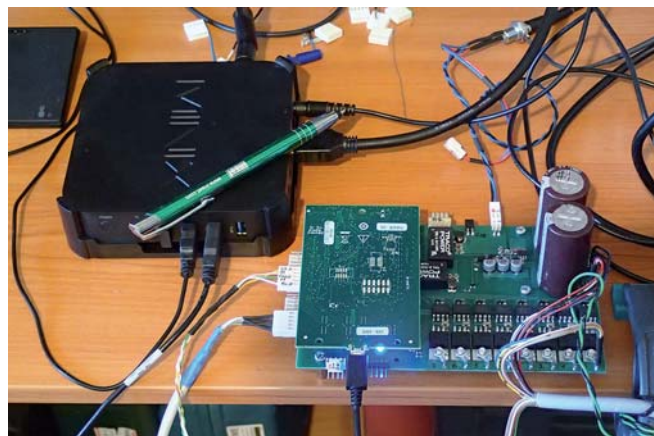
Development of the measurement device and sensors

The development has always responded flexibly to the practical needs as well as to the enhancement level of electronics and computing in the given period. The first computer-controlled device was used in 1994 for the measurement of force in the pre-stressed tendons of Temelín nuclear power plant reactor containments in the Czech Republic. The first microprocessor-controlled impulsive device was used on the Jiangyin and Nanjing bridges across the Yangtze River in China. The device was not composed of commercially manufactured parts, which was challenging for both its development and production.

Since 2015, the company Inset has been developing a new generation of the EM measuring system, the core element of which is the industrial measurement card (DAQ), supplemented by the necessary (mostly simple) circuits. Computer controls the entire measurement and evaluation process with LabVIEW VI applications. This makes it possible to flexibly adapt the configuration of the measuring system to the specific needs of the customer. Remote control and data transfer over the Internet are a matter of course. In Fig. 5, the measuring device Dynamag NT408 (Projstar, 2004) is compared to the prototype of the Triomag_8S (Inset, 2018) measuring device. The DAQ NI USB 6001/2 OEM is used for control and data acquisition. The current measuring device is highly-sophisticated and it can be metrologically verified. All measuring devices are mutually interchangeable and able to measure both static and dynamic stress of the measured element with the same EM sensor of the new generation.

The EM sensors have gone through the similar development. The current measuring sensor of EMHM type can be metrologically verified and measured by any EM device. The EM sensor parameters and the measurement process are optimized so that the influence of measurement on the measured object (mainly the heat increase of the measured element) is minimal. It should be remembered that the sensor is the measured ferromagnetic material itself with its elasto-magnetic properties. A database of materials suitable for the EM method application is an important part of the research.





Obr. 5 Vľavo: 8-kanálová aparátúra Dynamag NT408 (šírka 325 mm), vpravo: prototyp 8-kanálovej aparátúry Triomag_8S s riadiacim počítačom Minix NEO Z83-4 Pro
Fig. 5 On the left: 8-channel measuring device Dynamag NT408 (325 mm wide), on the right: a prototype of the 8 channel measuring device Triomag_8S with Minix NEO Z83-4 Pro

Podobným vývojom prešli aj EM snímače. Súčasný merací snímač typu EMHM možno metrologicky overiť a merať ľubovoľnou EM aparátúrou. Parametre EM snímača a proces merania sú optimalizované tak, aby bol vplyv merania na meraný objekt (hlavne zohrievanie meraného prvku) minimálny. Treba si uvedomiť, že snímačom je samotný meraný feromagnetický materiál a jeho elasto-magnetické vlastnosti. Databáza materiálov vhodných na aplikáciu EM metódy je dôležitou súčasťou výskumu.

Príklady realizácií merania síl

Na webovej stránke www.projstar.sk sú uvedené najvýznamnejšie realizácie EM monitoringu, ktoré vykonala firma PROJSTAR-PK, s. r. o., od roku 1992. V tomto príspevku uvádzame tieto:

Dlhodobá spoľahlivosť EM metódy

V rokoch 1986 až 1987 sme v rámci spolupráce TSÚS Bratislava a Stavebnej fakulty SVŠT realizovali monitoring napätosti v závesoch zaveseného mosta cez rybník Jordán v Táboře, ČR. Išlo o prvý letmo betónovaný zavesený most v Československu a prvú aplikáciu EM metódy pri výstavbe inžinierskeho diela. Na meranie sily v závesoch mosta (18 lán 15,5 mm v tenkostennej oceľovej rúre) boli vyvinuté EM snímače H125 spolu s aparátúrou na ich meranie počas výstavby a konečnej rektifikácie závesov. Posledné meranie snímačov sa realizovalo v roku 1989, odvtedy sú snímače dlhodobo vystavené poveternostným podmienkam. Pri technológii ich výroby sa predpokladalo iba krátkodobé použitie počas výstavby.

Vo februári 2018 vykonala firma Inset kontrolné meranie pomocou prototypu meracej aparátúry Inset ATXP. Z celkového počtu 26 snímačov sa podarilo odmerať 16 snímačov (ostatné mali poškodené prírody) a z priebehu majoritnej hysteréznej slučky vypočítať napätie v jednotlivých závesoch. Priemerná hodnota napätia bola 699 MPa, maximálne napätie 804 MPa, minimálne napätie 600 MPa, čo je v rozsahu pôvodne projektovaných hodnôt. Vlastnosti EM snímača závisia len od geometrických rozmerov a počtu závitov jeho vinutí, nemenia sa časom. Životnosť samotného EM snímača je prakticky neobmedzená.

Meranie dynamického namáhania pomocou dynamického EM snímača

V rámci certifikačného konania kotevného systému PROJSTAR-CH sa realizovali aj únavové skúšky kotvenia. Nad štandard požiadaviek ETAG 013 sme vykonali EM meranie napätosti vo vybraných lanách. Na tento účel vyvinula firma Projstar-PK dynamický EM snímač a aparátúru na jeho meranie. Skúška prebiehala na pulzátore ÚSTARCH SAV v Bratislave. Kábel bol zostavený z ôsmich lán s priemerom 150 mm², celková maximálna sila bola 1 451 kN, maximálna sila na jedno lano 181,375 kN, požadovaný rozkmit dynamickej zložky namáhania 12 kN. Na meranie dynamickej zložky sa použil dynamický EM snímač (šípka vľavo), na meranie statickej sily EM snímače

Examples of forces measurement performance

The web site www.projstar.sk presents the most significant performances of the EM monitoring carried out by PROJSTAR-PK, s. r. o. since 1992. In this paper we can mention the following:

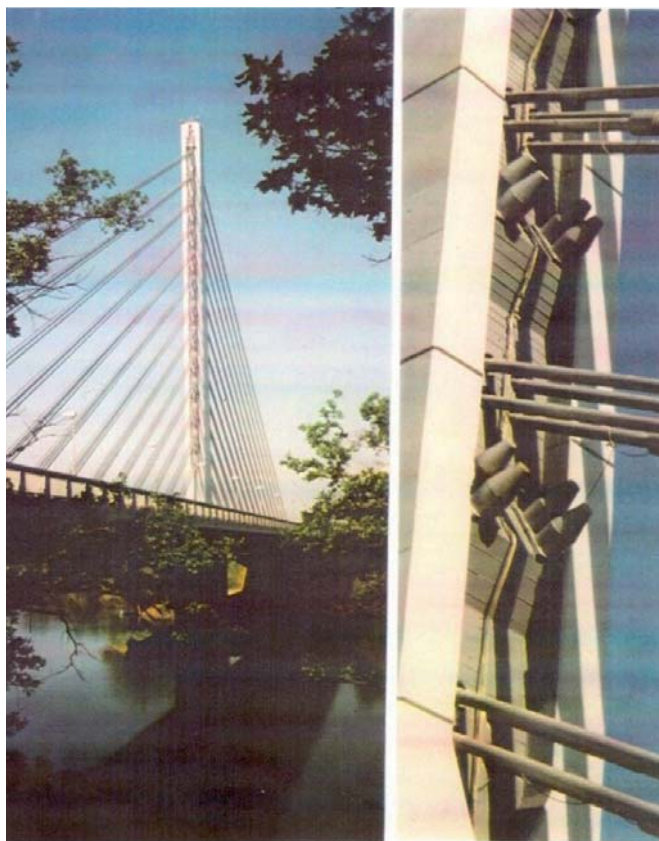
Long-term reliability of the EM method

In the years 1986 – 1987, within the framework of cooperation between the Building Testing and Research Institute, Bratislava and the Faculty of Civil Engineering of Slovak University of Technology, we monitored the tension in the cables of the cable stayed bridge over the pond Jordán in the town of Tábor, Czech Republic. It was the first cable stayed concrete bridge built by the free cantilever method in Czechoslovakia and the first application of the EM method to the construction engineering work. For the measurement of the force in the stay cables of the bridge (18 cables of 15.5 mm in a thin-walled steel tube), the H125 EM sensors were developed as well as a device for their measurement during the construction and final rectification of cables. The last measurement of the sensors was done in 1989. Since then the sensors have been exposed to weather conditions, although, considering the technology of their production, the sensors were designed for only a short-term use during construction.

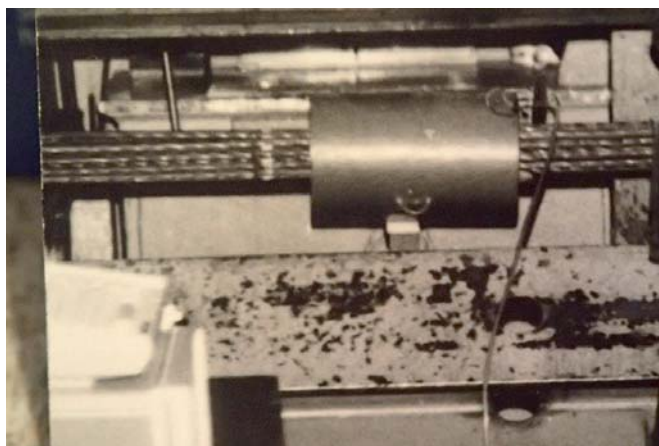
In February 2018, the company Inset carried out a control measurement using the prototype of the Inset ATXP measurement device. Out of the total number of 26 sensors 16 were measurable (others had damaged leads) and the stress in the individual stay cables were calculated from the course of the hysteresis loop majority. The average stress is 699 MPa, the maximum stress is 804 MPa, and the minimum stress is 600 MPa, which falls within the range of originally designed values. The features of the EM sensor depend only on the geometric dimensions and the number of threads of its winding, they do not change in time. The lifespan of the EM sensor itself is practically unlimited.

Dynamic stress measurement using dynamic EM sensor

Within the certification procedure of the PROJSTAR-CH anchor system, the fatigue anchoring tests were also carried out. Outside the standard ETAG 013 requirements, the EM has been used to measure stress in the selected tendons. For this purpose, Projstar-PK has developed a dynamic EM sensor and a device for its measurement. The test was carried out on the USTARCH SAV pulsator in Bratislava. The tendon was composed of eight 150 mm² strands, a total maximum force was 1 451 kN, a maximum force per strand was 181.375 kN, and the required dynamic stress component range was 12 kN. To measure the dynamic component, a dynamic EM sensor (left arrow) was used to measure the static force of the EM sensor PSS16 (right arrow). The course of the force in the four of the eight strands during the tendon loading, and the course of the dynamic loading of one strand in the fatigue test is shown in Fig. 8. The dynamic stress curve



Obr. 6 Zavesený most v Táboře
Fig. 6 Cable stayed bridge in Tábor

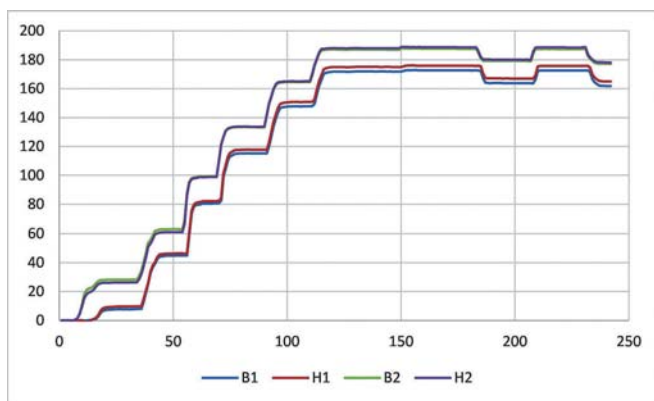


Obr. 7 Testovanie EM snímača H125 v roku 1986, Kloknerov ústav, Praha
Fig. 7 Testing of the EM sensor H125 in 1986, Klokner institution, Prague

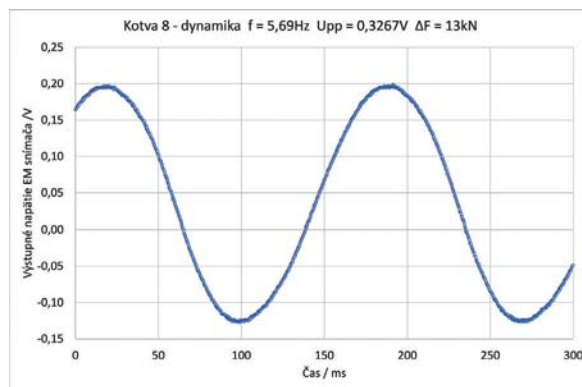
PSS16 (šípka vpravo). Priebeh sily v štyroch z ôsmich lán pri zaťažovaní kábla a priebeh dynamického namáhania jedného lana pri únavovej skúške sú zobrazené na obr. 8. Tvar dynamického namáhania s kmitočtom 5,69 Hz je sínusový. Opäť sa prejavuje nerovnomerné rozdelenie sily medzi jednotlivé laná krátkeho kábla pri skupinovom napínaní (napriek veľmi starostlivej inštalácii vzorky).

Záver

Keď sme v roku 1984 začali s vývojom EM monitoringu predpínacej sily, nikto z nás nepočítal s tým, že to bude taký úspešný príbeh. Základom úspešnosti bola tímová práca riešiteľského kolektívu fyzikov a stavbárov. Veľkým prínosom pre prácu riešiteľského tímu a popularizáciu metódy bola realizácia monitorovacích prác na mostoch v zahraničí a transformácia našich výsledkov prostredníctvom spoločných vedeckovýskumných a realizačných projektov s UIC Chicago, KRC Japonsko a DSI SRN.



Obr. 8 Dynamické namáhanie lán pri únavovej skúške
Fig. 8 Dynamic loading of strands in the fatigue test



with a frequency of 5.69 Hz is sinusoidal. Again, there is an uneven distribution of force between the individual strands of the short tendon at the group stressing (despite the very careful sample installation).

Conclusion

In 1984, when we started to develop the EM monitoring of the pre-stressing force, none of us had anticipated that it would turn out to be such a successful story. The teamwork of physicists and construction engineers was the basis for the success. A great contribution to the work of the team and the popularization of the method was the implementation of monitoring work on bridges abroad and application of our results through joint scientific research and realization projects with UIC Chicago, KRC Japan and DSI Germany.