



## **VYUŽITÍ INOVOVANÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU DYNAMAG\_ISIS PRO MONITOROVÁNÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ V OCELOVÝCH KONSTRUKCÍCH**

### **USE OF THE DYNAMAG\_ISIS INNOVATIVE MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING THE MECHANICAL STRESS IN THE STEEL CONSTRUCTIONS**

*Pavel Obluk<sup>1</sup>*

#### **Abstrakt**

Cílem této studie je prezentovat inovovaný měřicí systém založený na měření magnetoelastických vlastností feromagnetických materiálů v rámci monitoringu stavebních konstrukcí. Příspěvek popisuje implementaci původního měřicího systému na mostu v Linci, který převádí mezinárodní silnici A26 přes Dunaj a je zavěšen na dvou betonových blocích přikotvených k podloží lanovými zemními kotvami. Tyto zemní kotvy byly opatřeny magnetoelastickými snímači, které umožnily jak sledování napínacího procesu, tak následný monitoring po ukončení výstavby. Vzhledem k problémům s poškozením spojovacích kabelů v důsledku stavebních prací byl vyvinut inovovaný měřicí systém ISIS, který využívá odolnější magnetoleastické snímače pouze s primárním vinutím.

#### **Abstract**

The aim of this study is to present an innovative measurement system based on the measurement of magnetoelastic characteristics of ferromagnetic materials for monitoring building structures. This paper describes the implementation of the original measurement system on the Linz bridge which runs over the international road A26 over the Danube River and is suspended from two concrete blocks fixed with strand ground anchors. These anchors were equipped with magnetoelastic sensors, which allowed the force to be monitored not only during tensioning but also after the construction. Due to problems with damage to the connected cables due to construction work, the innovative ISIS measurement system was developed. This system uses more durable magnetoelastic sensors equipped with the primary winding only.

## **Klíčová slova**

*Magnetoelastický dynamometr, hysterezní smyčka, zemní kotvy, indukčnost*

## **Key words**

*Magnetoelastic dynamometr, hysteresis loop, ground anchors, inductance*

## **1. Úvod**

Most Donautalbrücke v rakouském Linci převádí mezinárodní silnici A26 přes řeku Dunaj (Obr. 1). Na obou březích ústí do tunelů, přitom překonává vzdálenost cca 400 m. Mostní konstrukce je zavěšena na ocelových lanech zakotvených na opěrách tvořených betonovými bloky, které jsou přikotveny k podloží 64 lanovými zemními kotvami (Obr. 2). V průběhu výstavby byly v roce 2019 na všech zemních kotvách na každé straně mostu instalovány magnetoelastické snímače s vnitřním průměrem 20 mm, které byly kalibrovány v průběhu napínacího procesu pomocí certifikovaného hydraulického napínacího zařízení. Zároveň umožnily sledování vlastního napínacího procesu a stanovení výsledné síly po zakotvení a odpojení hydraulického zařízení. Magnetoelastické snímače byly následně připojeny do stacionárního měřicího systému pro dlouhodobý kontinuální monitoring (Obr. 3). V průběhu výstavby docházelo k opakovaným problémům v důsledku poškození spojovacích kabelů stavební technikou i pracovní nekázní dělníků a některé snímače musely být složitě opravovány (Obr. 4). Zkušenosti z této stavby i řady dalších vedly k vývoji inovovaného měřicího systému, který využívá podstatně odolnější magnetoelastické snímače tvořené pouze primárním vinutím. Přitom byla uplatněna principiálně nová metodika založená na měření volného zániku magnetujícího proudu v měřeném materiálu. Tato metodika vyžaduje použití stacionárního DC zdroje nebo odpojitelných kondenzátorů pro magnetizaci materiálu a měřicí aparaturu pro měření v režimu RL, tedy v elektrickém obvodu charakterizovaném pouze odporem a indukčností místo obvodu RLC, kde přistupuje rovněž kapacita kondenzátoru při původním měření impulsní metodou.

## **2. Měřicí metodika**

Magnetoleastický měřicí systém je založen na využití magnetoelastického principu, tedy změny magnetoelastických vlastností některých feromagnetických materiálů odpovídající jejich aktuálnímu napjatostnímu stavu (Fabo a kol., 2010). Snímače mají tvar válců, které jsou nasunuty na měřený prvek, ve výše uvedeném případě na jedno lano v kotevním svazku. Standardně jsou opatřeny primárním budícím vinutím pro impulsní magnetizaci měřeného materiálu a sekundárním snímacím vinutím pro detekci vzniklého indukovaného napětí. S využitím Faradayova indukčního zákona  $V_{ind}(t) = -d\Phi(t)/dt$  je pak pomocí analogového integrátoru vypočten magnetický tok a pomocí kalibračního vztahu  $F/\Phi$  určena působící síla (Obluk, 2024).



*Obr. 1 Most Donautal-brücke*



*Obr. 2 Monitorovaný objekt: opěra mostu*



*Obr. 3: Stacionární měřicí jednotka se snímači*



*Obr. 4 Poškozená spojovací kabeláž*

Inovované snímače ISIS jsou vybaveny pouze primárním (magnetujícím) vinutím, které představuje neoddělitelné sériové spojení elektrického odporu  $R$  a indukčnosti  $L$ . Elektrický proud  $I(t)$ , protékající vinutím, vytvoří magnetické pole  $H(t)$ . V objemu měřeného

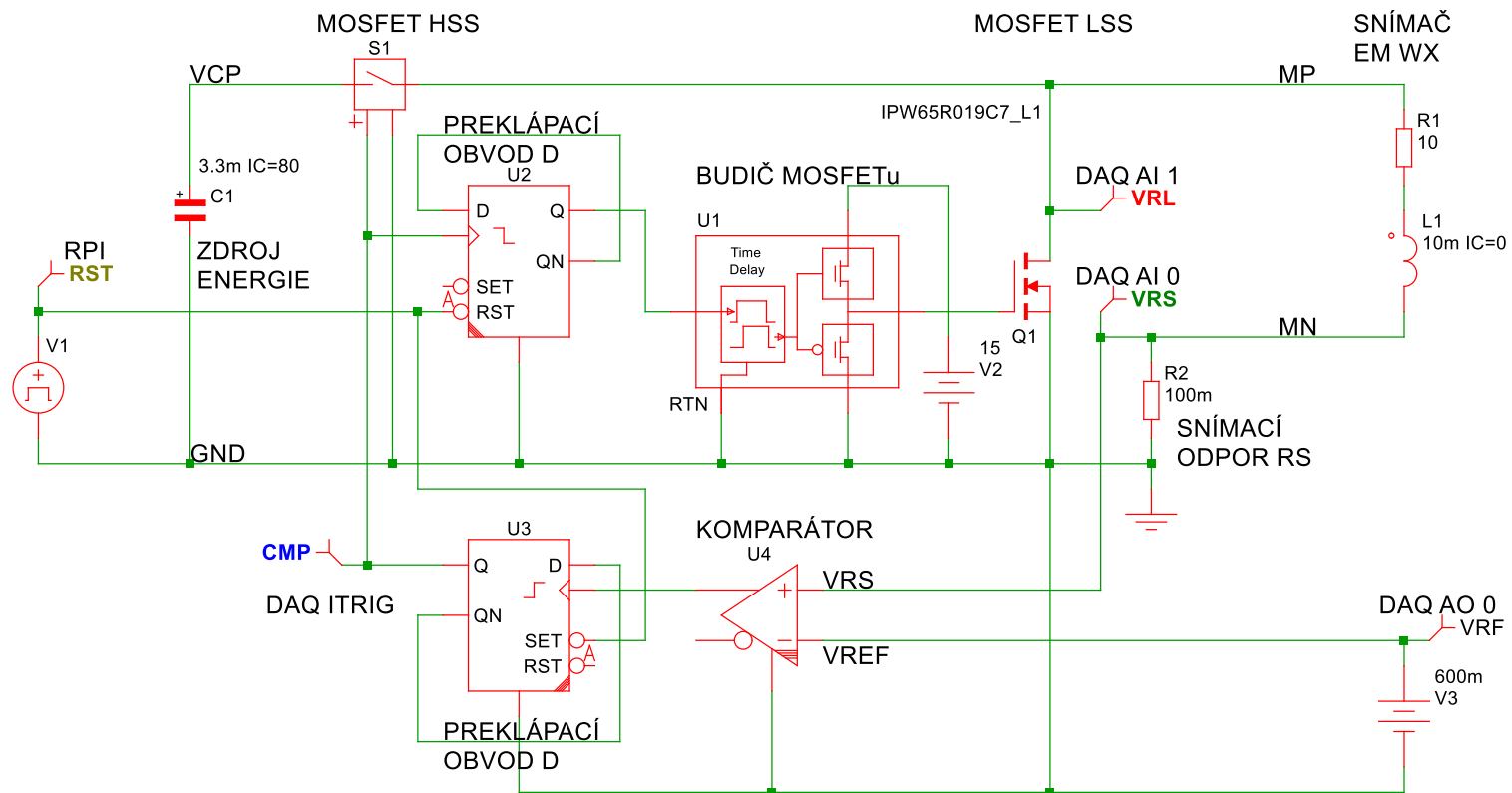
materiálu s magnetizací  $M(H)$  vznikne magnetická indukce  $B(t)$ , což lze v SI soustavě zapsat pomocí vztahu  $B(t) = \mu_0 \cdot [M(H) + H(t)]$ . Průřezovou plochou materiálu  $AF$  bude protékat magnetický indukční tok  $\Phi(t) = AF \cdot B(t)$ . Indukčnost cívky je definovaná vztahem  $\Phi = L(I) \cdot I$ , kde  $\Phi$  představuje “svázaný” magnetický indukční tok, vytvořený průtokem proudu  $I$ . Pokud je do dutiny cívky vložen měřený materiál, magnetický indukční tok se zvětší o příspěvek od magnetizace materiálu a změna indukčnosti cívky bude úměrná změně magnetizace měřeného materiálu, způsobené například mechanickým namáháním materiálu tahem.

Na měření vlastní indukčnosti cívky lze použít RL obvod, popsaný diferenciální rovnicí  $L \cdot dI(t)/dt + R \cdot I(t) = V$  s počáteční podmínkou  $I(0)$ . Řešením homogenní rovnice ( $V = 0$ , která představuje zkrat) s počáteční podmínkou  $I(0) = I_0$  (v indukčnosti vinutí je akumulovaná energie  $L = I_0^2/2$ ) je časový průběh  $I(t) = I_0 \cdot e^{(-R \cdot t/L)}$ . Poměr  $L/R$  má rozměr času (časová konstanta RL obvodu) a  $L = -R \cdot t / \ln[I(t)/I_0]$ . Tento postup je použitelný přibližně i v případě nelineární indukčnosti  $L(I)$  v oblasti, kde se závislost indukčnosti od proudu projevuje zanedbatelně.

Měřicí aparatura umožňuje odpojení zdroje magnetujícího proudu ve vhodném okamžiku  $I_0$ , kdy je již hodnota tohoto proudu ustálená, a změření odporu  $R$  v RL obvodu. Ze vztahu pro výpočet indukčnosti je pak vypočtena indukčnost a zjištěná závislost indukčnosti  $L(F, t)$  na proudu  $I(t)$ .

### 3. Měřicí technologie

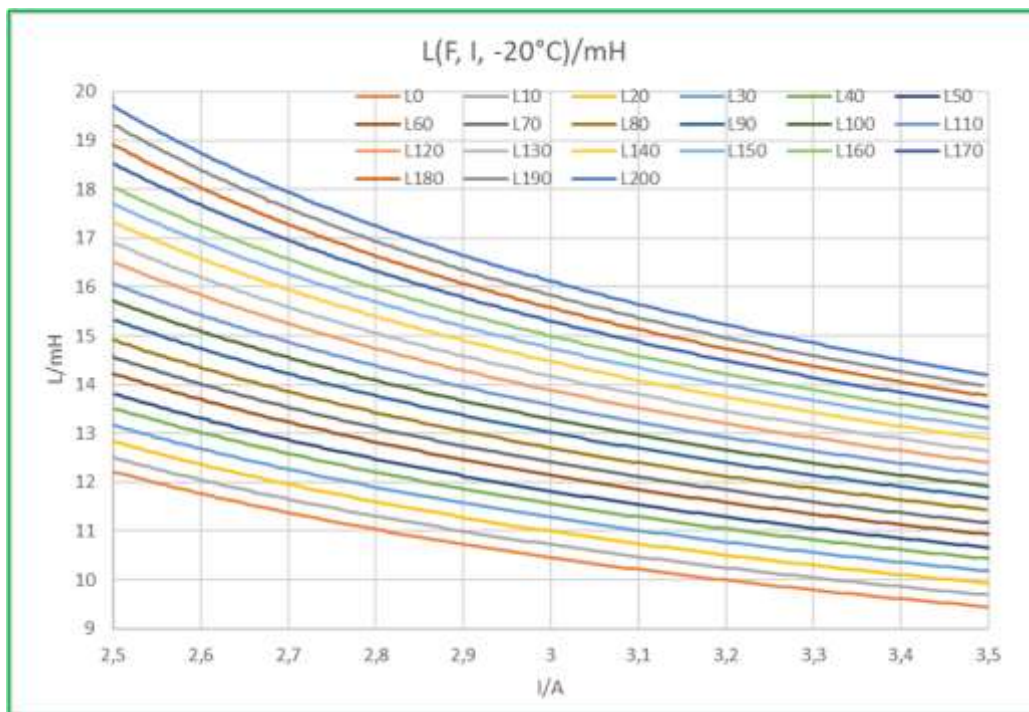
Měřicí aparatura obsahuje snímací odpor  $RS$  zapojený v sérii s magnetoelastickým snímačem a kondenzátorem  $C1$  pro vytvoření RLC obvodu, výkonový HSS (High Side Switch) spínač  $S1$  pro přepínání z RLC obvodu do RL obvodu, řízený LSS (Low Side Switch) spínač  $Q1$  pro přemostění kondenzátoru jako ideální dioda, zdroj referenčního napětí  $V3$ , napěťový komparátor  $CMP$  pro porovnávání napětí na snímacím odporu  $VRS$  s referenčním napětím  $VRF$  a řídicí jednotku napojenou na výstup z napěťového komparátoru a na ovládací vstupy výkonového HSS spínače a řízeného LSS spínače, přičemž ovládací vstup řízeného LSS spínače je připojen k řídicí jednotce přes zpožďovací obvod  $U3$  pro zpožděné sepnutí řízeného LSS spínače vůči výkonovému HSS spínači. Magnetoelastický snímač musí obsahovat alespoň magnetizační vinutí  $WX$  pro vytvoření časově proměnného magnetického pole za účelem magnetizace měřeného materiálu. Schéma měřicího systému je zobrazeno na Obr. 5.



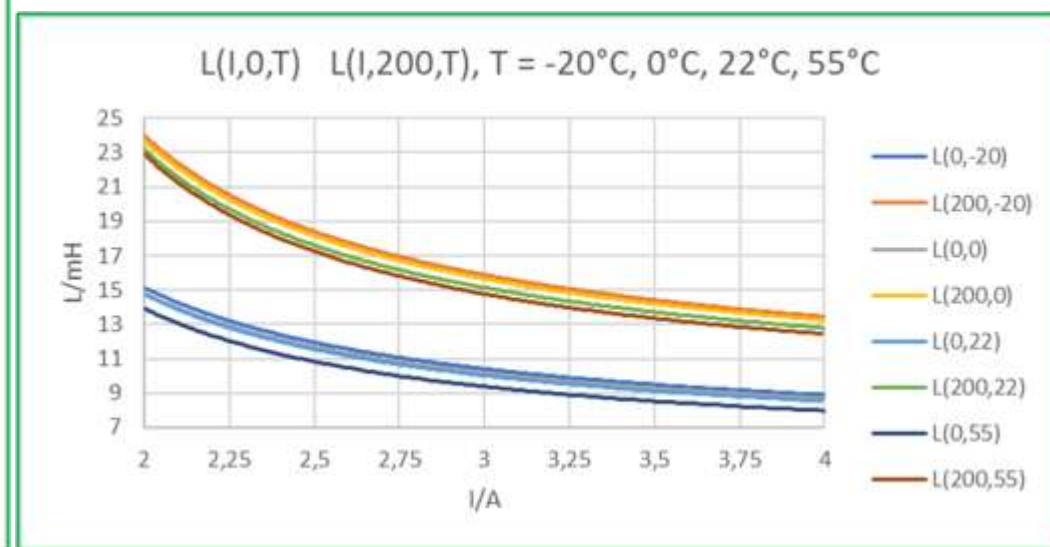
*Obr. 5 Schéma inovovaného měřicího systému*

### 3. Výsledky měření

Funkčnost inovovaného měřicího systému byla vyzkoušena laboratorním měřením s využitím hydraulického zkušebního zařízení Tinius Olsen 300 kN. Snímač s vnitřním průměrem 20 mm byl instalován na běžném laně 15,7 mm, které bylo postupně napínáno v krocích 10 kN od 0 kN do 200 kN. Tímto způsobem byla získána kalibrační závislost indukčnosti  $L$  na síle  $F$ . Vzhledem k tomu, že indukčnost závisí nejen na napjatostním stavu měřeného materiálu, ale i na jeho teplotě, byla provedena další analogická měření při různých teplotách od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $55^{\circ}\text{C}$  s využitím teplotní komory. Výsledky měření jsou zobrazeny na grafech níže (Obr. 6 a Obr. 7).



*Obr. 6 Závislost indukčnosti na síle v intervalu 2,5A – 3,5A*



*Obr. 7 Závislost indukčnosti na teplotě v intervalu 2A – 4A*

#### 4. Závěr

Provedená laboratorní měření potvrdila správnost nové měřicí metodiky i funkčnost inovovaného měřicího systému. Závislost indukčnosti na vnesené síle umožňuje měření s dostatečným rozlišením na jednotky kN. V oblasti pracovního bodu kolem 3A má lineární charakter. Teplotní závislost představuje posun kalibrační křivky na ose y, lze tedy snadno uplatnit teplotní korekci.

Inovovaný magnetoelastický měřicí systém DYNAMAG\_ISIS lze s výhodou využívat pro bezkontaktní měření mechanického napětí ve feromagnetických materiálech cylindrického průřezu. Představuje tak výhodnou alternativu jak k běžně využívaným metodám měření síly v konstrukci, fungujícím na principu mechanického přetvoření či využívajícím hydraulický nebo pneumatický tlak, tak k původnímu magnetoleastickému měřicímu systému. Volně vložený magnetoelastický snímač nemusí být v přímém kontaktu s konstrukcí, nijak ji neovlivňuje a nepředstavuje ohrožení její integrity (Obluk a kol., 2013). Může být proto použit i v případech, kdy výrobce certifikovaného kotevního systému nedovoluje připojení externího měřicího prvku, jako je např. extenzometr, hydraulický dynamometr apod. Snímač umožňuje měření vnesené síly v průběhu napínacího procesu i po jeho ukončení. Díky dlouhodobé životnosti v řádu desítek let může být

používán pro periodická kontrolní měření, event. pro měření po případné mimořádné události, jako je např. vichřice, povodeň nebo zemětřesení (Fabo a Obluk, 2013). Při zapojení do stacionárního měřicího systému se vzdáleným řízením a automatickým přenosem dat může zasílat zprávy při překročení nastavených varovných stavů. Vzhledem k možnosti měření v dynamickém módu lze sledovat také únavu materiálu nebo překročení stanovených konstrukčních limitů. Ve spojení s dalšími monitorovacími metodami, např. geodetickými a inklinometrickými měřeními, může poskytovat komplexní informace o stavu a chování konstrukce.

Inovovaný měřicí systém je výhodnější oproti původnímu nejen kvůli vyšší odolnosti snímačů, ale také díky úspoře energie nutné pro magnetizaci měřeného materiálu. Zatímco dříve byla vypotřebovaná celá kapacita kondenzátorů, které se při každém měření zcela vybijí, nyní lze kondenzátory odpojit při dosažení počáteční podmínky I0 a dosáhnout tak významné úspory energie. Tímto způsobem se rovněž zabrání nežádoucímu ohřívání snímače. V neposlední řadě dochází k úspoře výrobních nákladů při výrobě snímače vzhledem k eliminaci poměrně pracného navijení sekundární cívky z velmi tenkého drátu.

## Poděkování



**Spolufinancováno  
Evropskou unií**

Projekt je realizován v rámci programu The Country for the Future Ministerstva průmyslu a obchodu a spolufinancován z prostředků Evropské unie v rámci NEXT GENERATION EU

## References:

- FABO, P., BLAŽEK, P., TKÁČ, J., OBLUK, P., TURČÁK, J.: Měření vývoje sil v kotvách pomocí magnetoelastického dynamometru Dynamag. *In Sborník příspěvků 15. mezinárodního semináře Zpevnování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí*, Ostrava, 2010, s. 115 – 117.
- FABO, P., OBLUK P.: Meranie napätia v oceľových lanách pomocou magnetoelastického dynamometra Dynamag. *In The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS, Medzinárodný časopis DOPRAVA A LOGISTIKA*, Košice, 2013, s. 125 – 127.
- OBLUK, P., FABO, P., TKÁČ, J.: Non-contact mechanical tension measurement in prestressed concrete structures. *In Concrete and Concrete Structures*, 2013, Procedia Engineering, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com), s. 273 – 277
- OBLUK, P.: Monitorování síly pomocí měřicího systému Dynamag. *In: Inženýrské stavby / Inženýrské stavby 3/2022*, Bratislava, 2022, s. 19.
- OBLUK, P.: Využití měřicího systému Dynamag pro monitorování mechanického napětí ve visuté lávce. *In: Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment XXXI.1 (2024)*, 2024, s. 43 – 49.

---

## Autor:

<sup>1</sup>RNDr. Pavel Obluk, MBA. - INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 – Vinohrady, [obluk.pavel@inset.com](mailto:obluk.pavel@inset.com)