

INVERSE ANALYSIS OF LOADING OF THE WALKING UNDERCARRIAGE FRAME OF GIANT MACHINE ZP 10000

Z. Ramík*, D. Lehký**, S. Vejvoda*, D. Novák **

Summary: *The paper deals with inverse analysis of loading the frame of walking undercarriage of the giant machine for the development of brown coal on the open mine Bilina. Artificial neural network has been trained using virtually simulated random loading and displacements based on the undercarriage frame model. Elastic model containing shell and 3D elements was developed using FEM program SYSTUS. Measured data by certified IAM Laboratory was used.*

1. Úvod

Rošt kráčejícího podvozku zakladače ZP 10000 patří k nejvíce namáhaným částem velkstroje pracujícího na dole Bílina. Celý zakladač je zobrazen na obr. 1. Rošt hlavního podvozku je ve střední části ocelové konstrukce. Podkladem k posouzení zbytkové životnosti zakladače ZP 10000 byl komplex měření realizovaný akreditovanou zkušební laboratoří ÚAM Brno.



Obr. 1 Celkový pohled na zakladač ZP 10 000

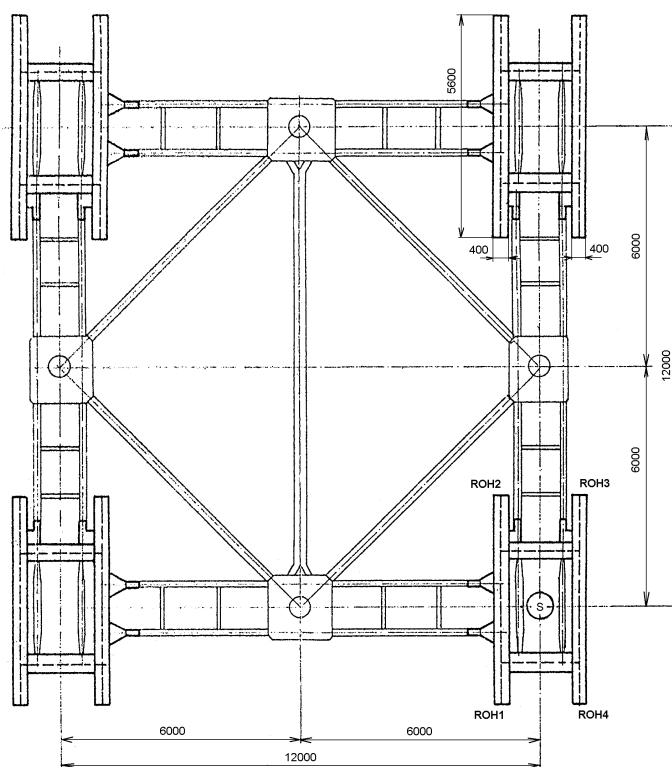
* Ing. Zdeněk Ramík, Prof. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc.: Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.; Veveří 95; 611 00 Brno; tel.: +420541212429, fax: +420541211189; e-mail: ramikz@uam.cz, uam@uam.cz

** Ing. David Lehký, Prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební; Veveří 95; 602 00 Brno; tel.: +420541147361, fax: +420541147360; e-mail: lehky.d@fce.vutbr.cz

Identifikace skutečného zatížení roštu kráčejícího podvozku byla provedena využitím inverzní analýzy umělými neuronovými sítěmi. Neuronové sítě byly trénovány na základě analýzy vazeb mezi měřenými veličinami a vypočtenými posuvy od jednotkových zatížení modelu podpěry roštu podvozku. Podpěry roštu podvozku byly řešeny na MKP modelu zahrnujícím skořepinové a 3D elementy programem SYSTUS.

2. Popis roštu kráčejícího podvozku zakladače ZP 10 000

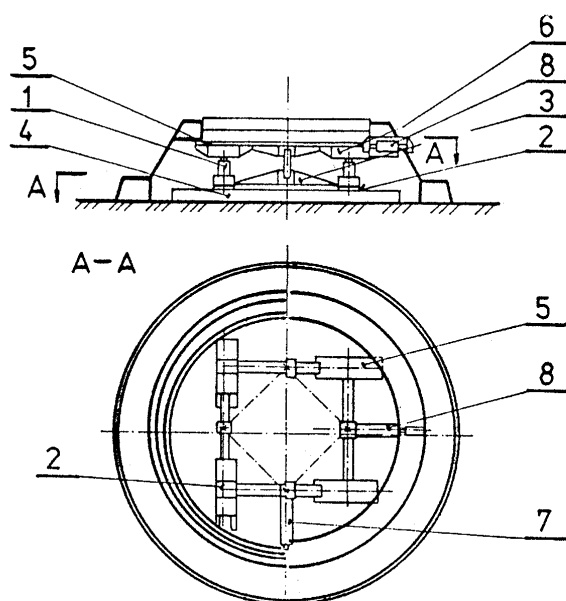
Rošt kráčejícího podvozku zakladače ZP10000 se skládá ze čtyř podpěr, jejichž masivní části nesou čtyři zdvihové válce. Na obr. 2 je vidět rozměrové schéma celého roštu 12 x 12 m. Řešená jedna podpěra má délku 5600 mm. Průměr zdvihového válce S je 900 mm a průměr pístnice 630 mm. Na obr. 2 jsou označeny rohy v souladu s umístěním čidel TR1 až TR4 pro měření posuvů konců jedné podpory roštu ve svislém směru oproti hydraulickému válci S.



Obr. 2 Schéma roštu kráčejícího podvozku

Pásnice roštu kráčejícího podvozku jsou na kótě +1,470 přišroubované po celé délce k přímé kulové dráze. Spodní část přímé kulové dráhy je na kótě +1,200 přišroubovaná k vnitřní kruhové desce průměru 23 m. Vnitřní kruhová deska je nosníková konstrukce, přímo s terénem je ve styku plech tloušťky 25 mm. Na obr. 3 je schéma kráčejícího podvozku.

Při kráčení je délka kroku cca 1,2 m a kruhová deska se zdvihá cca 200 mm nad terén. Pohyb libovolným směrem je výslednice posuvů po spodní přímé kulové dráze a po horní kulové dráze. Horní kulová dráha leží na roštu nad zdvihovým válcem a je v průmětu kolmá ke spodní přímé kulové dráze.



- 1 - hydraulický zdvihový válec
- 2 - spodní přímá kulová dráha
- 4 - vnitřní kruhová deska
- 5 - horní přímá kulová dráha

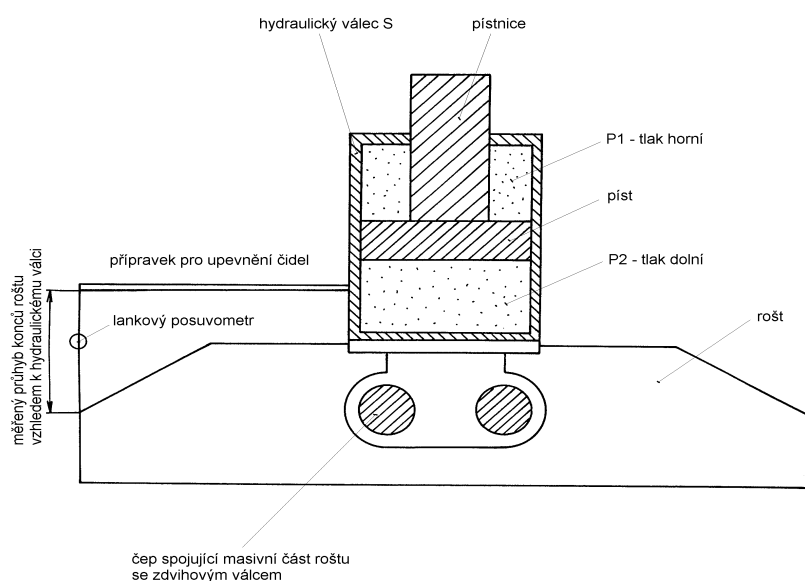
Obr. 3 Schema kráčejičího podvozku

3. Měření posuvů

Průhyby rohů roštu vzhledem k hydraulickému válci byly měřeny lankovými senzory WDS-1250-Z50-C-P firmy Micro-sensor,s.r.o. Bechyně v ČR. Tlaky v hydraulickém zdvihovém válci byly měřeny tlakovými snímači typu P4AP firmy HBM ze SRN. Data byla měřena frekvencí 50 Hz. Označení lankových senzorů TR1 až TR4 odpovídá označení rohů na schématu roštu hlavního podvozku na obr. 2.

Při zdvihání stroje je v činnosti prostor pod pístem (měřený tlak P2 – dolní, na obr. 4). Jak jde píst nahoru, vnitřní kruhová deska pod roštem podvozku se opře o zeminu a zvedá se celý stroj. Rohy roštu se ohýbají nahoru vlivem tlaku zeminy přenášené na pásnici. Při posuvu rohů nahoru se zmenšuje měřený rozdíl vertikální polohy válce a rohu roštu.

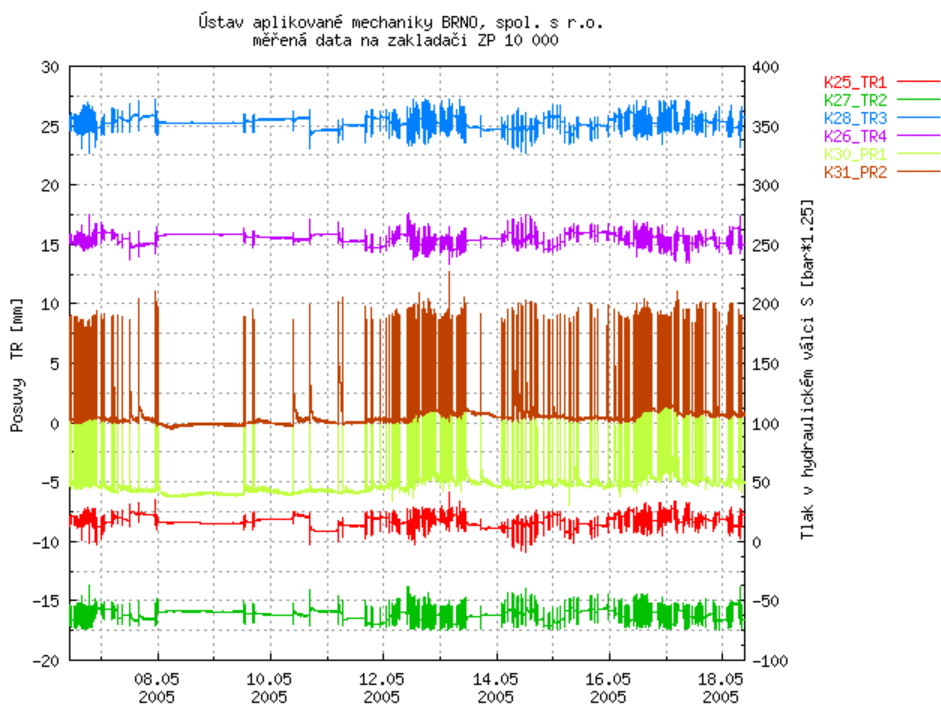
Při zdvihání roštu včetně dosedací desky je v činnosti prostor mezikruží nad pístem (měřený tlak P1 – horní, na obr. 4). Jak jde píst dolů, zvedá se rošt podvozku spolu se zdvihovým válcem, který jde nahoru. Při zvedání roštu se zvětšují měřené rozdíly vertikální polohy zdvihového válce a rohů roštu.



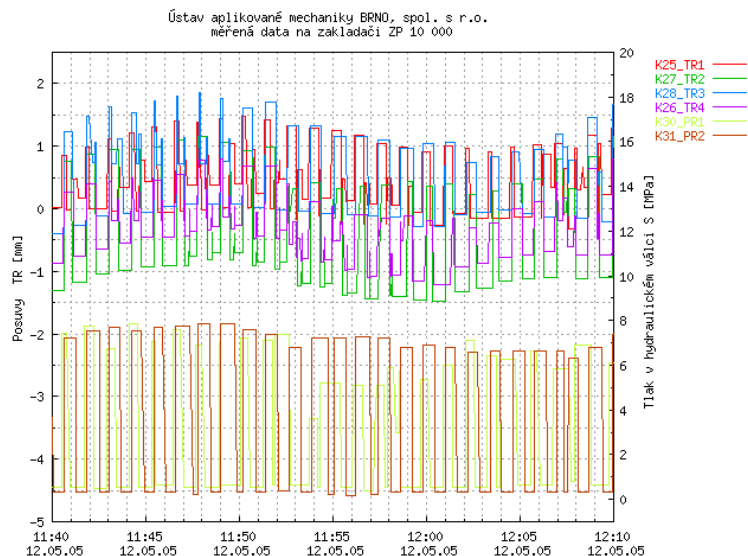
Obr. 4 Funkční schéma měření

3.1. Změřená data

Na obr. 5 jsou vykresleny nekorigované změřené posuvy rohů podpěry roštu ZP10000. Korigované posuvy po zahrnutí nulového čtení, změně znaménka posuvometrů TR1 a TR3 a převedení tlaků v hydraulickém válci na MPa jsou detailně vidět na obr. 6.



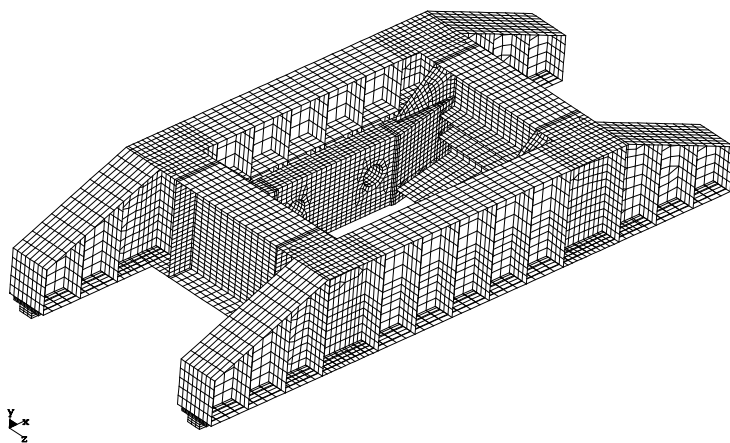
Obr. 5 Měřené nekorigované posuvy.



Obr. 6 Korigované posuvy

4. Metoda výpočtu a popis modelu

Výpočty posuvů a napětí podpěry roštu hlavního podvozku zakladače ZP 10000 byly provedeny metodou konečných prvků programem SYSTUS.

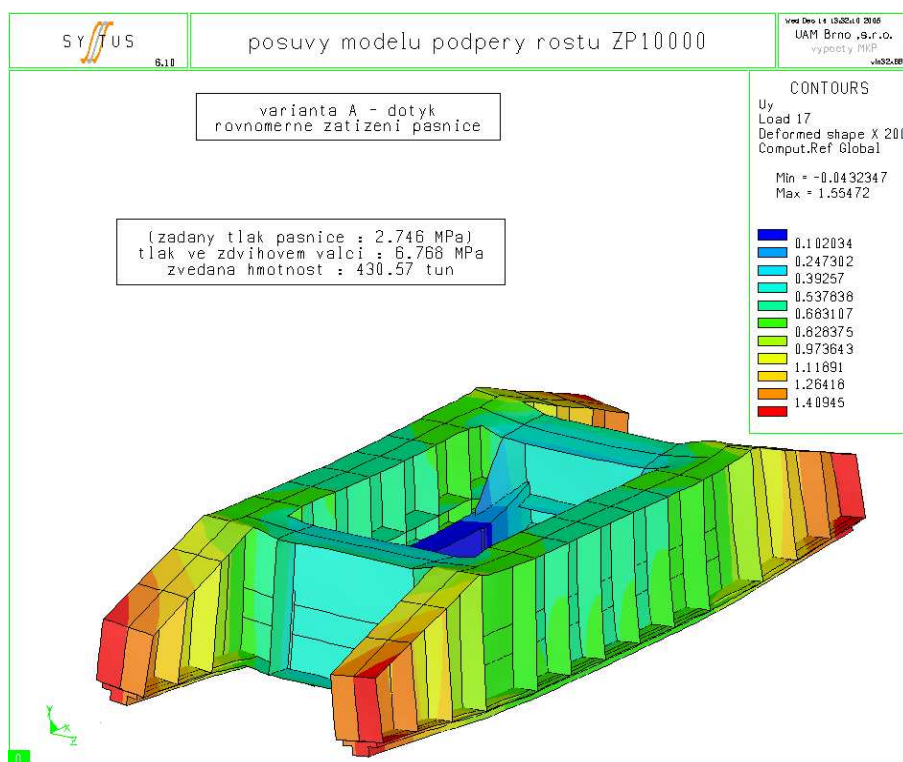


Obr. 7 Geometrická diskretizace modelu podpěry roštu ZP 10000

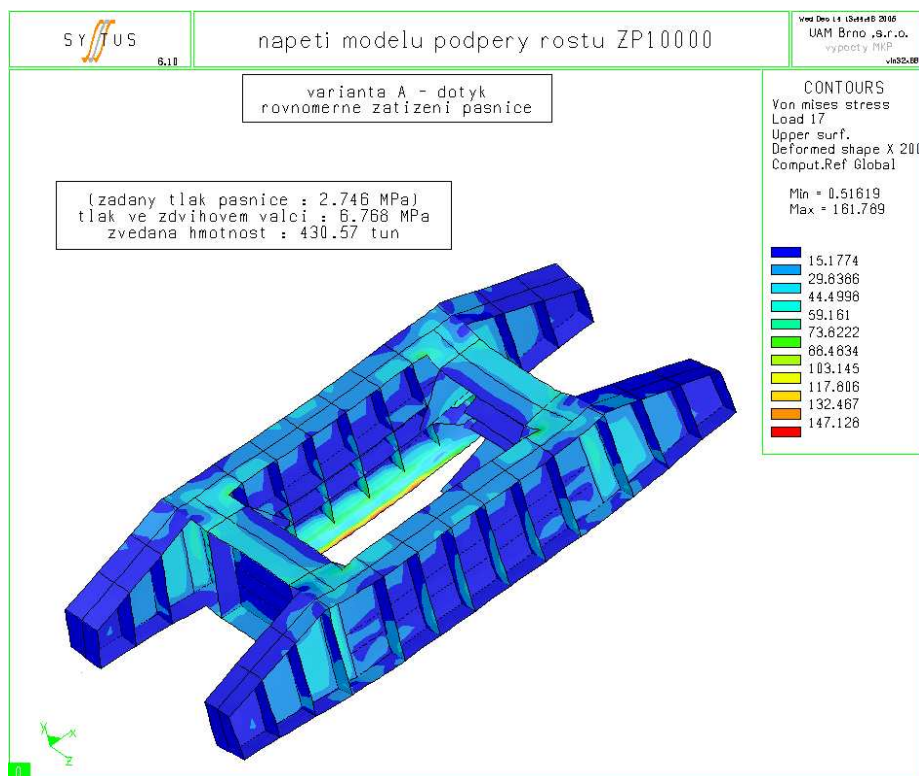
Podélné a příčné nosníky a vodorovné a svislé výztuhy konstrukce jsou tvořeny skořepinovými elementy odpovídající tloušťky. Tloušťky skořepinových nosníků a výztuh se v souladu s výkresy pohybují mezi 10 až 46 mm. Masivní části které přenáší přes čepy zatížení od zdvihového válce a profily horní části přímé kulové dráhy jsou tvořeny 3D elementy. Model je uchycen v otvorech masivní části v místech čepů. Přenášený tlak zeminy byl modelován plošným zatížením zadaným

na 16 úseků přímé kulové dráhy pod pásnicemi. Plošná zatížení směřují vzhůru a v rozsahu jednoho úseku jsou konstantní. Materiál je ocel 48 a 52, jejich ekvivalentem je ČSN 11523 pro nosníky a výztuhy roštu a ocel ČSN 11503 pro masivní části.

Dle obr. 9 jsou nejvíce namáhané svary ve spodní části spojující masivní části s plechy roštu.



Obr. 8 Vertikální posuvy UY varianty A6,768

Obr. 9 Redukované napětí σ_{HMH} roštu podpěry varianty A6,768

5. Analýza vztahu měřených a vypočtených posuvů

Dle měření a dostupných podkladů měřený tlak ve zdvihovém válci při zatížení podpory roštu je vyšší než 6 MPa a menší než 11 MPa, což představuje zvedanou hmotnost mezi 381,7 a 699,8 tunami.

Hodnoty posuvů rohů podpěry jsou závislé na typu terénu pod vnitřní kruhovou deskou. Při stejné zvedané hmotnosti se tedy mohou posuvy rohů ve vertikálním směru zvětšovat i zmenšovat dle typu terénu. Dle typu terénu, za předpokladu symetrického zatížení, mohou nastat tři mezní varianty, pro které byly vypočteny následující posuvy:

- | | |
|-------------------------|--|
| varianta A „dotyk“ | - 1,24 až 2,28 mm
(Předpoklad přizpůsobení měkké zeminy tak, že s terénem je v dotyku celá oblast vnitřní kruhové desky která rovnoměrně přenáší na pásnice tlak.) |
| varianta B „prohlubeň“ | - 2,20 až 4,05 mm
(Předpoklad prohlubně v oblasti pod kruhovou deskou, takže tlak se přenáší na pásnice pouze v oblasti rohů.) |
| varianta C „vyvýšenina“ | - 0,52 až 0,96 mm
(Předpoklad vyvýšeniny v oblasti pod kruhovou deskou, takže tlak je přenášen střední částí pásnic a úseky pásnic v oblasti rohů podpěry jsou nezatížené.) |

Posuvy od zatížení odpovídajícího s přesností aproximace měřeným hodnotám posuvů lze obdržet lineární kombinací posuvů od jednotkových tlaků po určení vhodných násobitelů tlaků.

Zavedeme označení:

i	[-]	- index rohových uzlů
j	[-]	- index úseku pásnice
t	[s]	- čas
A_j	[mm ²]	- plocha úseku pásnice
A_s	[mm ²]	- plocha zdvihového válce pro průměr válce $D_s = 900$ mm
$P(t)$	[MPa]	- tlak ve zdvihovém válci (měřeno)
U_{ij}	[mm]	- vypočtené posuvy rohových uzlů pro jednotková zatížení úseků pásnic tlakem 1 MPa (na modelu Systusu)
$UY_i(t)$	[mm]	- posuvy rohových uzlů (vypočteno)
$TR_i(t)$	[mm]	- měřené posuvy rohových uzlů
ε_i	[-]	- přesnost aproximace měřených a vypočtených posuvů rohových uzlů (zvoleno na podkladě analýzy měřených hodnot)
$k_j(t)$	[-]	- násobitele tlaků úseků pásnic (hledané řešení neuronovými sítěmi)

Hledané řešení ve formě násobitelů tlaků $k_j(t)$ bude vhodnou aproximací zatížení podpěry rámu při splnění následujících podmínek:

- 1) Celkové zatížení pásnic dotykem se zemí je v silové rovnováze se zatížením působícím na podpěru rámu od zdvihového válce S s tlakem $P(t)$.

$$\text{Tedy: } P(t) \cdot A_s = \sum_{j=1}^{16} k_j(t) \cdot A_j \quad (1)$$

$$A_s = 0,25 \cdot \pi \cdot D_s^2 = 636172,58 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

- 2) Při zvedání zakladače je pásnice zatížena tlakem pokud dosedá na zeminu. Úseky pásnice, které nedosedají, jsou nezatížené.

$$\text{Tedy: } k_j \geq 0 \quad (3)$$

- 3) Celkové posuvy rohových uzlů jsou lineární kombinací od jednotkových zatížení úseků pásnic.

$$\text{Tedy: } UY(t) = \sum_{j=1}^{16} k_j(t) \cdot U_{ij} \quad (4)$$

- 4) Měřené posuvy rohových uzlů lze aproximovat vytvořeným modelem podpěry roštu v programu SYSTUS.

$$\text{Tedy: } |TR_i(t) - UY_i(t)| \leq \varepsilon_i \quad (5)$$

Na modelu SYSTUSU byly samostatně pro 16 úseků pásnic vypočteny posuvy rohových uzlů U_{ij} pro jednotková zatížení. Posuvy U_{ij} spolu s rovnicemi (1), (2), (3) a (4) byly naprogramovány do procedury SimulSys. Procedura SimulSys byla integrována do statistického simulačního programu FReET (Novák et al., 2005) pro přípravu trénovací množiny zpracované následně programem pro práci s neuronovými sítěmi DLNNET (Lehký, 2005). Procedura tak nahradila časově náročnější výpočet programem SYSTUS, proto bylo umožněno pro přípravu trénovací množiny pracovat s poměrně velkým počtem simulací (zde 500).

6. Inverzní analýza pro zjištění proměnlivosti zatížení po délce roštu

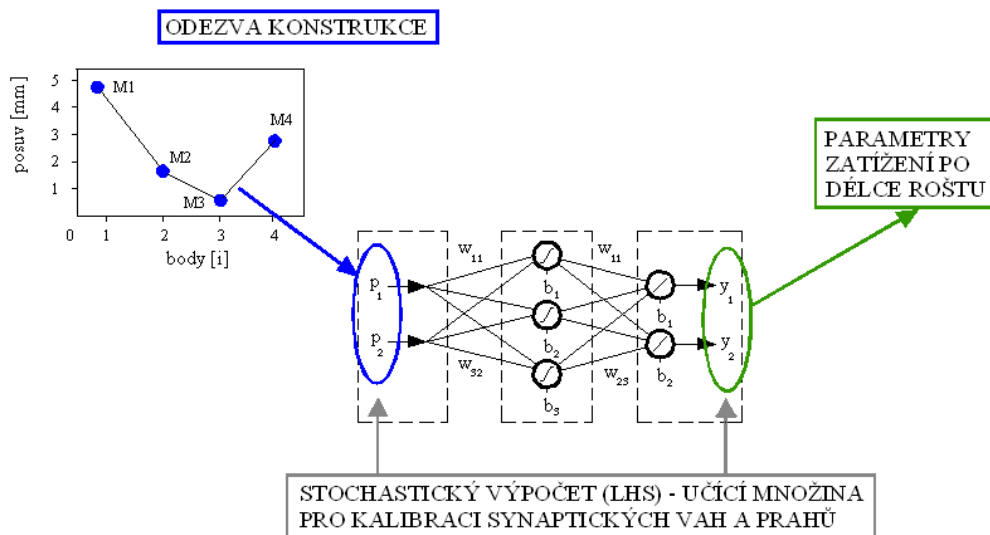
Cílem inverzní analýzy je identifikovat prostorovou proměnlivost (po délce roštu, vždy na dvou částech) zatížení od zeminy na základě experimentálního měření in-situ. Experiment představuje 4 měření absolutních posuvů na 4 koncích roštu. Na každé ze dvou částí roštu je uvažováno 8 úseků s konstantním zatížením jednotlivých úseků, celkem tedy $2 \times 8 = 16$ úseků pro identifikaci. Tento počet byl stanoven víceméně heuristicky jako nejnížší možný, dělení je založeno na geometrii. Větší počet úseků by na jedné straně mohl vystihovat skutečnost přesněji, ovšem na straně druhé by mohl vést ke špatně podmíněné úloze inverzní analýzy, neboť máme k dispozici pouze 4 měřené posuvy a tlak ve zdvihovém válci pro jeden zatěžovací stav..

6.1 Metodologie

Navržená inverzní analýza představuje kombinaci statistické simulace a neuronových sítí. Identifikujeme 16 hodnot zatížení (násobitelů jednotkového zatížení, viz dále) určujících zatížení na rošt na základě 4 změřených posuvů. Celý postup je možno popsat v následujících bodech:

- 1) Nejdříve je nutné vytvořit výpočtový FEM model daného problému, zde FEM model v SYSTUSu, který zahrnuje parametry modelu (IP), které budou předmětem identifikace (zde 16 hodnot zatížení na pásy roštu podvozku zakladače) tak, aby odezva FEM modelu byla v určitém souladu s experimentálními daty (MD) – zde 4 posuvy v rozích roštu podvozku zakladače.

- 2) IP modelu (zde 16 zatížení na jednotlivé úseky roštu) dále uvažujeme jako náhodné veličiny popsané matematickým modelem rozdělení pravděpodobnosti, rovnoměrné rozdělení představuje přirozenou volbu, neboť dolní a horní mez tohoto rozdělení může představovat hranice reálného výskytu daného parametru. Nicméně jiná rozdělení pravděpodobnosti je možno rovněž použít, např. normální, chceme-li potlačit extrémní parametry a naopak zdůraznit oblast výskytu s největší pravděpodobností. S výhodou pracujeme místo absolutních hodnot zatížení s jejich násobiteli, neboť výpočet v SYSTUSu byl vhodně prováděn s jednotkovými zatížením na pásy roštu. IP modelu nasimulujeme pomocí vhodné simulace typu Monte Carlo (LHS). Výsledkem jsou náhodné realizace IP (vektor $\mathbf{y}$). Je možné uvažovat i statistickou závislost mezi IP (je-li alespoň přibližně známa, může inverzní analýze při následném stochastickém trénování pomoci).
- 3) S náhodnými realizacemi IP $\mathbf{y}$ pak provedeme opakované řešení FEM výpočtového modelu a získáme statistický soubor virtuální odezvy $\mathbf{p}$.
- 4) Náhodné realizace $\mathbf{y}$ a získaná náhodná odezva z FEM modelu $\mathbf{p}$ slouží jako stochastický vstup pro učení vhodné neuronové sítě. Tento klíčový prvek celého postupu je ilustrativně znázorněn na obr. 10.
- 5) Jakmile je neuronová síť naučena, pak lze na jejím základě zodpovědět otázku opačnou: Určit nejlépe soubor IP tak aby FEM model poskytl co nejlepší shodu s MD. To se provede simulací neuronové sítě s MD jako jejím vstupem. Výsledkem je soubor parametrů $\mathbf{y}_{\text{opt}}$.
- 6) Závěrečná verifikace výsledků postupu představuje FEM výpočet s parametry $\mathbf{y}_{\text{opt}}$, tj. vypočteme pomocí SYSTUSu (SimulSys) posuvy roštu se zatížením získaným inverzní analýzou. Srovnání numericky získaných výsledků (4 posuvy v rozích z FEM modelu v SYSTUSu) s MD (4 změřené posuvy v rozích roštu) poskytne představu o tom, jak byla inverzní analýza úspěšná.



Obr. 10 Schéma identifikační metody

Výše uvedená teorie je realizována v software, jenž je možno snadno aplikovat prakticky na jakýkoliv problém inverzní analýzy. Tento otevřený programový systém vznikl integrací software pro statistickou, citlivostní a pravděpodobnostní analýzu FReET (Novák et al., 2005) a software pro práci s neuronovými sítěmi DLNNET (Lehký, 2005).

Poznamenejme, že FEM model v tomto případě představoval komplexní FEM software SYSTUS – nahrazen lineárním řešením pro jednotkové posuvy realizovaném v proceduře SimulSys, která poskytuje stejné výsledky s malými časovými nároky a je snadněji implementovatelná.

6.2 Výsledky inverzní analýzy

Pro inverzní analýzu byly zvoleny 3 případy odpovídající variantám A, B a C zmíněným v kapitole 5, tedy „dotyk“, „prohlubeň“ a „vyvýšenina“. V této první fázi se jednalo o ověření správnosti a funkčnosti navržené metodologie, kde posuvy odpovídají daným variantám a byly získány numericky programem SimulSys ze známého rozložení zatížení. Přesto budeme v dalším používat termínu „experiment“.

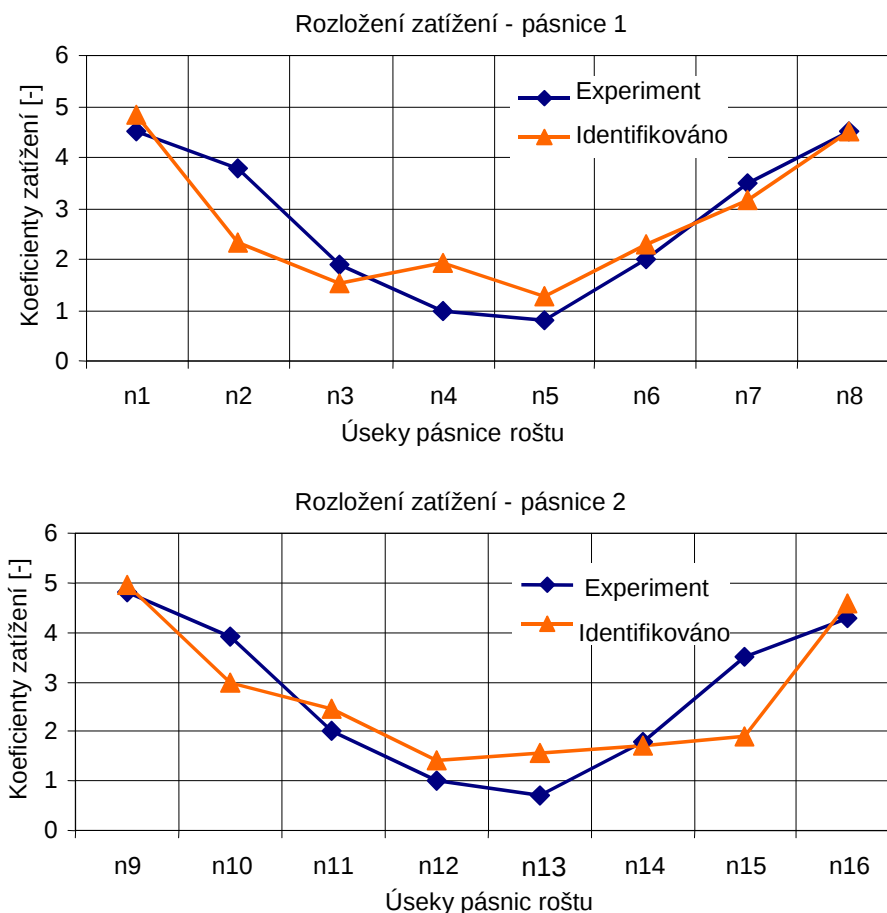
Hlavním prvkem navržené identifikační metody je neuronová síť. V našem případě se jednalo o dopřednou síť typu vícevrstvý perceptron skládající se z jedné skryté vrstvy čítající 10 neuronů s nelineární přenosovou funkcí a výstupní vrstvou čítající 16 neuronů s lineární přenosovou funkcí odpovídající 16 hledaným koeficientům zatížení roštu. Jako vstup sítě sloužily 4 hodnoty průhybů jednotlivých rohů roštu. Takto sestavená neuronová síť byla nejprve podrobena učicí fázi. Učící množinu tvořilo 500 dvojic vstup-výstup (4 posuvy konců roštu-16 koeficientů zatížení) získaných stochastickou simulací v softwaru FReET (500 simulací). Za účelem dosažení dostatečné obecnosti naučené sítě byly hodnoty v učící množině normovány na jednotkový tlak ve zdvihovém válci.

Poté, co byla síť naučena, jí byly předloženy skutečné normované hodnoty posuvů odpovídající třem výše zmíněným variantám. Výsledkem simulace sítě byly hodnoty koeficientů zatížení, které se následně přepočítaly na skutečné hodnoty tlaku ve zdvihovém válci. S takto stanoveným zatížením byl proveden závěrečný výpočet a porovnány hodnoty průhybů rohů roštu (tabulka 1). Vzhledem k tomu, že vstupní hodnoty průhybů do inverzní analýzy byly získány simulací ze známého rozložení zatížení, je možné provést jeho přímé porovnání s výsledky analýzy (pro variantu B viz obrázek 11). Tím si lze udělat představu o jednoznačnosti úlohy a efektivnosti zvolené metody.

Tab. 1 Porovnání hodnot posuvů rohů roštu pro jednotlivé varianty: simulovaný experiment vs. identifikace

Veličina	Var. A – „dotyk“		Var. B – „prohlubeň“		Var. C – „vyvýšenina“	
	Exper.	Ident.	Exper.	Ident.	Exper.	Ident.
Posuvy: U1 [mm]	1,02	1,02	2,06	2,08	0,56	0,58
U2 [mm]	1,02	1,03	2,11	2,12	0,66	0,65
U3 [mm]	1,02	1,03	1,81	1,79	0,82	0,80
U4 [mm]	1,02	1,01	2,41	2,44	0,93	0,93
Tlak ve válci [MPa]	4,929	4,929	7,861	7,861	5,951	5,951

Z výsledků uvedených v tabulce 1 vyplývá, že inverzní analýza založená na umělých neuronových sítích poskytla velmi dobré výsledky, a že pro zadané hodnoty průhybů rohů roštu dokázala najít takové rozložení zatížení, které poskytne téměř shodné výsledky. To vše pro tři různá rozložení zatížení (varianty A až C).



Obr.11 Porovnání rozložení zatížení na obou pásnicích roštu pro variantu B „prohlubeň“: simulovaný experiment vs. identifikace

Při porovnání výchozího rozložení zatížení s rozložením, které poskytla neuronová síť (pro variantu B „prohlubeň“ viz obrázek 11, výsledky ostatních variant poskytly podobné výsledky) vidíme mírné rozdíly v hodnotách koeficientů, přestože hodnoty průhybů jsou téměř shodné. Z toho se dá vyvodit, že existuje několik řešení rozložení zatížení, které poskytne stejné hodnoty průhybů. Neuronová síť si pak na základě složení její učící množiny, která byla generována náhodně, vybrala jedno z možných řešení. Z obrázku 11 je patrné, že celkový trend rozložení zatížení byl podchycen (podobné výsledky byly získány i u zbylých dvou variant) i s pouhým využitím čtyř posuvů konců roštu.

Pro lepší představu o vlivu jednotlivých úseků na průhyby rohů roštu byla provedena rovněž citlivostní analýza, z níž vyplynula velická proměnlivost citlivosti úseků. Největší dominanci mají úseky na krajích roštu a jejich hodnoty byly také ve všech případech nej přesněji identifikovány. Naopak střední část roštu má citlivostní koeficient velmi blízký nule a hodnota koeficientu zatížení v těchto úsecích je velmi těžko stanovitelná. Jinými slovy, malá změna hodnoty jejího zatížení zanedbatelně ovlivňuje výsledný průhyb. Možnými východisky z daného problému může být například zavedení statistické korelace zatížení mezi jednotlivé úseky nebo zahrnutí do inverzní analýzy dalších parametrů jako např. průhyby v dalších bodech roštu či hodnoty napětí. Tyto varianty budou předmětem dalšího výzkumu.

7. Závěr

FEM výpočtový model podvozku zakladače byl použit spolu se statistickou simulací Monte Carlo a umělými neuronovými sítěmi pro identifikaci rozložení zatížení na podvozek zakladače. Vytvořené nástroje byly verifikovány na experimentálně vytvořených datech zahrnující mezní možné varianty zatížení podvozku. Verifikace potvrdila účinnost inverzní analýzy pomocí umělých neuronových sítí. Byly tak vytvořeny nástroje s jejichž pomocí je možné na základě skutečně změřených posuvů určit rozložení zatížení (včetně parametrů variability). To bude předmětem dalších prací, tak aby bylo v konečné fázi možno kvantifikovat spolehlivost konstrukce podvozku zakladače.

8. Poděkování

Práce vznikla v souvislosti s projektem FT-TA2/008, realizovaným za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu a projektu GAČR 103/04/2092.

9. Literatura

- Floryán J., Vejvoda S. (2004) Stanovení zbytkové životnosti ZP 10000 na základě provozního měření. Etapa 3.3a. *Projekt a příprava měření. Zpráva ÚAM Brno*, arch.č. 3614/04.
- Floryán J., Vejvoda S., Valenta M., Liška K. (2005) Stanovení zbytkové životnosti ZP 10000 na základě provozního měření. Etapa 3.3 b), e). Instalace měřicího systému a ověření jeho funkce. *Průběžné vyhodnocení měřených dat. Zpráva ÚAM Brno*, arch.č. 3709/05.
- Floryán J., Vejvoda S., Valenta M., Liška K. (2005) Stanovení zbytkové životnosti ZP 10000 na základě provozního měření. Etapa 3.3 c), d), e), f). Revize měřicího systému. Vyhodnocení měřených dat. *Závěrečná zpráva o měření. Zpráva ÚAM Brno*, arch.č. 3725/05.
- Hejčová J. (2004) Posouzení nosníků zdvihových válců kráčivého podvozku na stroji RK 5000. *Zpráva ÚAM Brno*, arch.č. 3640/04.
- Lehký, D. (2006) DLNNET – program documentation, theory and user's manual, Brno, (v přípravě).
- Lehký, D. & Novák, D. (2005) Inverse FEM analysis II: Random parameters identification of reinforced concrete frame. *Inženýrská mechanika 2005*, Svratka, Česká republika.
- Novák, D., Rusina, R., Vořechovský, M., Lehký, D. (2005) *FReET – program documentation. User's and Theory Guides*. Brno/Červenka Consulting, Prague.
- Novák, D. & Lehký, D. (2005) Inverse FEM analysis I: Stochastic training of neural network. *Inženýrská mechanika 2005*, Svratka, Česká republika.
- Ramík, Z. (2005) Verifikované postupy stanovení technického života dynamicky zatěžovaných konstrukcí. Etapa 5a. Metodika pro nalezení vztahu mezi napětím (poměrné deformace) v místě upevněného čidla a měřenými daty.
- SYSTUS (2004) version v6.10en, User's manual, ESI Group, programový systém MKP.
- Zderčík J. (2005) Doplňující informace, geometrie, funkce, zatížení. *Podklady zadavatele* (e-mail, tel.). Společnost PRODECO, a.s.