

Měření napětí sypkých hmot pomocí vyvinutého 3Dimenzionálního snímače

Aleš Slíva, Aleš Oujezdský, Lukáš Martinák

Proces dopravy, manipulace a skladování často provází vznik nežádoucích poruch v dopravních systémech [6]. Tyto poruchy mají za příčinu vznik nerovnoměrného toku materiálu, klenbování, komínování, vznik oblouku, jádrového toku ve skladovacích systémech, apod. Zajištění rovnoměrně regulovatelného toku materiálu vlivem přidání měřicích a automatizačních prvků do dopravních systémů [3] je podstatné pro bezproblémové fungování všech logistických řetězců podniku a tím garanci konkurenceschopnosti podniku a následného uplatnění v podmínkách EU.

Otázka zajištění rovnoměrnosti hmotového toku se týká především oblasti sypkých hmot, které představují asi 40% veškerého hmotového toku v průmyslu [5]. Chování ovlivňující rovnoměrnost toku sypkých hmot je dáno podmínkami skladování, vlivy okolního prostředí a všeobecně pak přirozenými a naprosto nepředvídatelnými vlastnostmi sypkých hmot, konstrukce skladovacího zařízení, apod. Z tohoto pohledu patří sypké hmoty, zvláště pak práškové struktury [3], mezi nejméně předvídatelné materiály ve vztahu k výše zmiňovaným jevům, ke kterým se ještě přidávají faktory mechanicko-fyzikálních vlastností (smyková pevnost, úhel vnitřního tření, počáteční smykové napětí, tokový faktor, apod.), geometrických vlastností (částicová distribuce, tvar, pórovitost, apod.) a faktory mezičásticové povahy, u kterých všeobecně platí, že čím menší částice, tím je jejich vliv větší (elektrostatické a kapilární síly, Van der Wallsovy síly, apod.).

V současné době neexistují vhodné prostředky-detekovací zařízení (indikátory tlaku-napětí), které by bylo schopné přesně určit místo a čas možného výskytu poruchy, speciálně pro skladovací systémy. Dnešní komerčně vyráběné detekovací zařízení pracují v režimu 2D a jsou situovány na obvod pláště skladovacího zařízení [4]. To je také důvod, proč často stěnové napětí nebo tlak sypké hmoty na skladovacím zařízení je měřen místo reálného tlaku sypké hmoty skladované v zásobníku. Problém se týká zejména oblasti skladování [6], kde tyto poruchy jsou nejproblematictější a mají za příčinu vznik nežádoucích prostožů a následně finanční ztrátu podniku projevující se špatnou návazností logistických funkcí.

Úvod

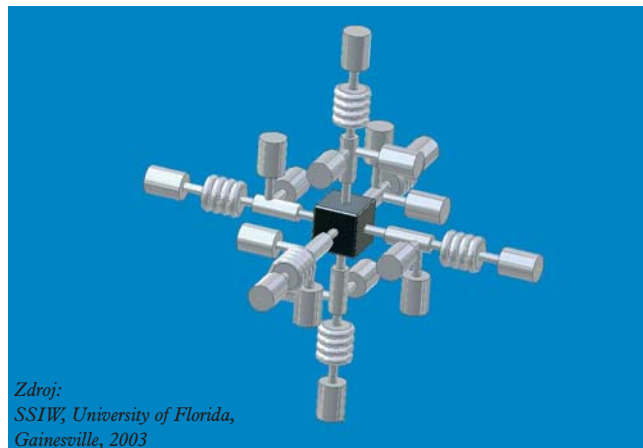
V rámci post-doc. grantu GAČR 101/03/D039 byl na Institutu dopravy Fakulty strojní Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava vyvinut zcela unikátní přístroj pro zkoumání 3Dimenzionálních tlaků (napětí) v sypkých hmotách-Třísosový snímač napětí sypkých hmot, včetně metodiky jeho měření [3]. Samotná metodika vyšetřování trojosových tlaků (napětí) vychází z teoretických základů napětí působících na element sypké hmoty krychlového tvaru [3]. Dřívější konstrukce obdobných přístrojů a přístroje nejnověji vyvíjené na zahraničních univerzitách jsou brány v úvahu a samotný vývoj přístroje se jimi silně inspiroje.

Při vývoji designu 3D snímače a jeho elektronického zapojení byly použity nejmodernější dostupné prostředky, včetně prostředků teoreticky simulujících namáhání v různých směrech snímače. Zkoušení a kalibrační práce na snímači byla realizována pomocí SW Comnes DAQ od fy. Consynea, a. s. a následné proměřování vzorku sypké hmoty v zásobníku v různých úrovních bylo prováděno za přispění kolegů z Katedry měřicí a řídicí techniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Metodika samotného měření a vyvíjený 3Dimenzionální snímač je zcela originální a bezesporu si zaslouhuje pozornost jako jeden z prostředků vyšetřování tekutosti zkoumané sypké hmoty. Podrobné zkoumání příčiny těchto poruch na základě přesné identifikace napětí v místě sypké skladované hmoty může být přesným a trvalým odstraněním příčin chování materiálu, které vede ke tvorbě výše zmiňovaných poruch. Zmiňovaný navržený 3D snímač včetně metodiky identifikace tlaků pomocí vhodného SW dokáže řešit poruchy toku v celé jeho šíři a navíc dokáže zaregistrovat veškeré okamžité jevy vyskytující se uvnitř-přímo v kontaktním místě sypké hmoty [3].

Konstrukce a vývoj 3Dimenzionálního (trojosového) přístroje pro snímání napětového stavu

Současný stav vývoje měřicích přístrojů pro zjišťování napětových stavů sypkých hmot ustrnul a nepřinesl žádné převratné novinky do oblasti vývoje zcela nových měřicích aparatur. Představované aparatury vyvíjené v posledních několika letech posunuly současně možnosti odhalování poruch toku sypkých hmot, ale vycházejí z koncepce obdobných zařízení vyvíjených v 60. a 70. letech 20. století (FT3 Powder Rheometer-viz. Vrtulová zkouška [3], apod.).



Zdroj:
SSIW, University of Florida,
Gainesville, 2003

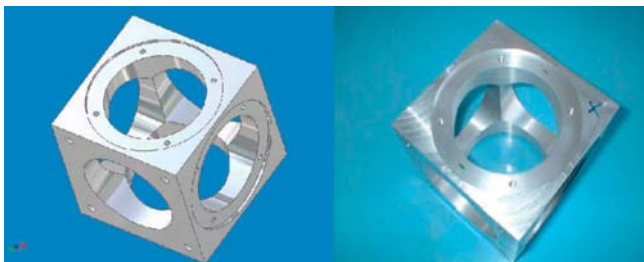
Obr.1 Model plně popisující napětový stav všech normálových a smykových napětí působících na element sypké hmoty



První vlaštvou přinášející pokrok v této oblasti byla studie modelu umožňujícího snímat trojosé napětí ve skladovacích systémech (obr. 1) a zaznamenávat neaktuálnější děj v sypké hmotě v libovolném místě skladovacího systému. Poprvé tento model byl představen v Gainesville, University of Florida v r. 2003. Tento „ryze teoretický“ model je schopný snímat všech 18 vyskytujících se smykových a normálních napětí (tlaků) na elementu sypké hmoty pomocí snímačů ukotvených na konstrukci a posléze na plochu krychle představující nosnou základovou konstrukci celého zařízení (obr. 1).

3Dimenzionální (trojosový) model měřící aparatury vyvíjený v Laboratoři sypkých hmot v rámci Post.-Doc. grantu 101/03/D039

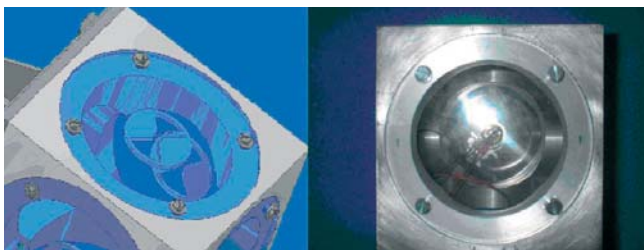
Koncepce modelu (obr. 1) bohužel nebyla dokončena a to převážně z důvodů praktické nemožnosti snímání všech 18-ti různých smykových a normálních napětí (tlaků) a následně jejich komplikovaného vyhodnocování. Toto vlastně byla výzva k návrhu zcela konceptně nového a odlišného modelu snímače tlaku (napětí) schopného snímat hlavní napětový stav v podobě hlavních normálních napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, obr. 11) a následně zobrazení napětového stavu snímané sypké hmoty ve skladovacím zařízení včetně teoretické analýzy napětového stavu. Také bylo přihlédnuto k ekonomickým hlediskům a vybráno pouze nezbytné množství součástek potřebných k návrhu a sestavení modelu i s ohledem k optimálnímu množství navržených snímačů.



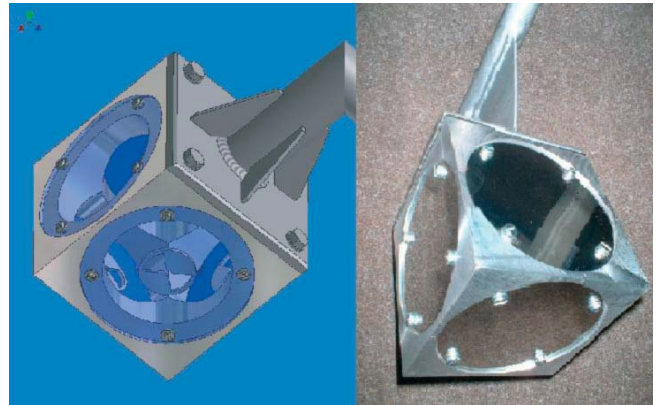
Obr.2 Počítačový návrh modelu krychlového tvaru (vlevo) a vyrobený tvar krychle (vpravo)

Již při samotné úvaze konstrukčního modelu byla vzata v potaz nutnost pevného základu pro samotné detektory (obr. 3) s cílem maximálně snížit deformační vlivy nosné konstrukce základu měřící aparatury ponořené do sypké hmoty skladovacího systému. Za tímto účelem byl navržen nosný základ krychlového tvaru (obr. 2) vycházející z počáteční inspirace teoretického napětového stavu. Pro výrobu nosného základu byl použit materiál s obchodním označením DURAL (hliník s příměsí 1,2 % manganu a dalších prvků), dostatečně pevný a deformačně odolný. V úvahu byly brány také agresivní schopnosti skladované sypké hmoty přicházející do permanentního styku s měřící aparaturou v průběhu sledování napětového stavu.

Základ krychlového tvaru byl opatřen osazením (obr. 2), aby tam mohly být vsazeny čtyři deformační čela (obr. 3 vpravo) pomocí čtyř válcových šroubů. Deformační čela byla navržena kruhového tvaru za účelem zachycení deformací v ose x, y a z a následné kontrole deformace v ose y (celkem tedy 4 čela). Právě kruhový tvar



Obr.3 Počítačový návrh modelu vsazení deformačního prvku s detektory deformace (vlevo) a deformační čelo s umístěním detektoru (vpravo)

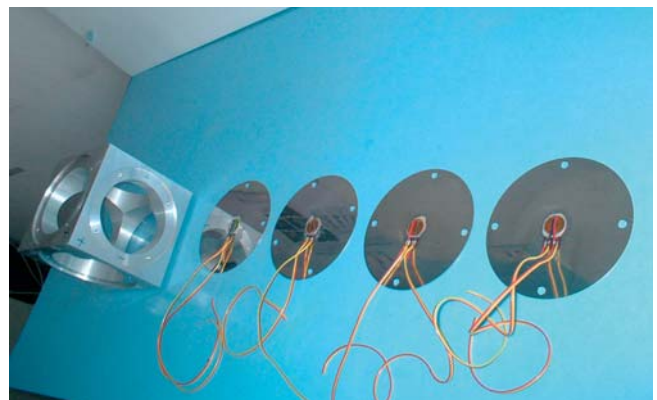


Obr.4 Počítačový návrh sestavy modelu se snímači a uchycení (vlevo) a smontovaný 3D snímač (vpravo)

čela splňuje kritérium symetrické deformace a napětového radiálního a tangenciálního namáhání (obr. 6) při přesném umístění detektorů deformace (tenzometrů) uprostřed vnitřní strany deformačního čela.

Uvedená deformační čela byla vyrobena z nerezového materiálu s příměsí zušlechťujících prvků (fosfor, apod.) zajišťujících pružnou deformaci bez creepových efektů až do meze úměrnosti deformačního materiálu čela. Patříčná tloušťka plechu deformačního čela vychází z počítačového modelování zatížení 3D snímače.

Vnitřní otvor nosného základu krychlového tvaru (obr. 2) vzniklý vyfrézováním otvorů pro deformaci čel byl využit pro umístění konstrukce snímačích a zesilovacích prvků deformačních detektorů včetně přívodu zdroje jejich napájení a signálů deformačních napětí přes nosnou ukotvující konstrukci (obr. 10). Základem této konstrukce (obr. 5 a 4) je klasická 1" trubka opatřená svarem do pravého úhlu a vyztužená plechem pro zabezpečení max. tuhosti nosné konstrukce. Celá konstrukce snímače, u které se předpokládá, že bude ponořena do sypké hmoty je konstruována vodotěsně a tudíž zamezuje vniknutí nečistot a poškození vnitřní elektroniky ukryté v nosné konstrukci. Styčné plochy deformačních čel a plocha mezi nosnou konstrukcí a ukotvením jsou utěsněny pomocí silikonu a pryže zabezpečující odolnost proti vlhkosti a nečistotám.



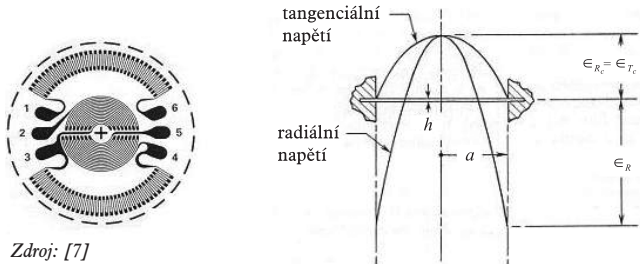
Obr.5 Nosný základ krychlového tvaru se čtyřmi deformačními čely opatřenými detektory deformace (tenzometry)

Umístění detektoru deformace (tenzometru) na vnitřní stranu deformačního čela 3D snímače

Deformační čelo 3Dimenzionálního snímače bylo navrženo kruhového průřezu a tudíž rozložení deformace a napětí potvrzené analyticky a modelováním při zatěžování je soustředěné se středem v ose deformačního čela (obr. 3).

Tato skutečnost vedla k použití speciálních kruhových membránových tenzometrů pro snímání deformace od sypké hmoty (obr. 6). Tyto tenzometry jsou schopné zachytit jak radiální tak tangenciální napětí od deformačního čela. Ve skutečnosti se zji-





Zdroj: [7]

Obr.6 Růžice detektoru deformace (tenzometru-vlevo) a průběh radiálních a tangenciálních napětí na tenzometru (vlevo)

šťuje napěťový stav sypké hmoty na základě deformace čela, tzn. tenzometru. Deformace drátků tenzometru se projeví změnou jejich délky (tj. odporů drátků) umocněné zapojením odporů do můstku a použitím zesilovačů (obr. 7). Tato deformace tenzometru vyvolá napětí na svorkách můstku [V] úměrné napětí v konkrétním místě skladovacího zařízení plněné sypkou hmotou [Pa~V]. Samozřejmě předpokládáme perfektní přilnavost tenzometrů na vnitřní stranu deformačního čela vhodným lepidlem. (obr. 3).

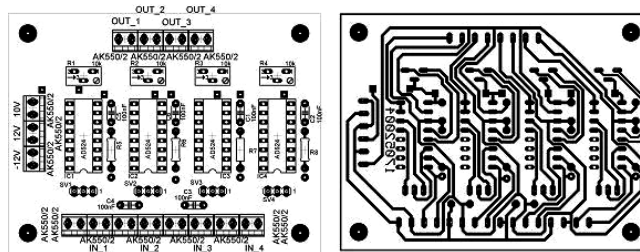
Z důvodu toho, že membránový tenzometr je pevně umístěn uprostřed kruhového deformačního čela, plyne nespočetné množství výhod. Především se jedná o výhodu detekce kladné hodnoty radiálního napětí a záporné hodnoty tangenciálního napětí (obr. 6). Rozlišení kladné a záporné hodnoty napětí je podstatné pro identifikaci druhu způsobeného napětí zvláště při malých deformacích tenzometru.

Použití zesilovačů AD524 pro zapojení do konfigurace plného můstku

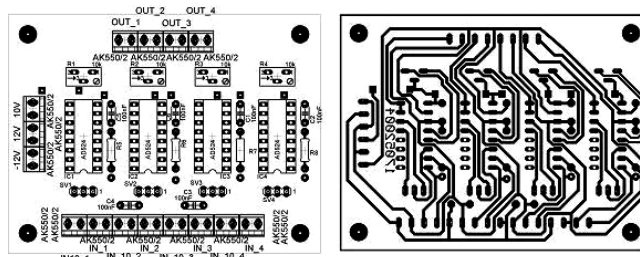
Za účelem snímání třech působících napětí v sypkých hmotách tj. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ bylo použito 4 deformačních čel s tenzometry, tj. 4 snímacích kanálů (obr. 11). Předpokládá se, že jeden kanál bude sloužit ke kontrolním účelům. Výstupní napětí z tenzometrických můstků je však řádově v mV a pro další zpracování a přenos signálu po vedení je třeba jej zesílit. K tomuto účelu byl navržen precizní čtyřkanálový zesilovač, který je osazen měřicími zesilovači společnosti Analog Device AD524.

Velkou výhodou těchto zesilovačů je jejich značná teplotní nezávislost, vysoké zesílení, velmi malé zkreslení atp. Navržený zesilovač obsahuje prvky pro nulování vstupního offsetu a nastavené zesílení 1000, aby zpracovávané signály byly dostatečné úrovně a měřicí karta tak pracovala v celém vstupním rozsahu s využitím všech 12 bitů pro A/D konverzi měřených signálů. Návrh a realizace zapojení těchto 4 zesilovačů AD 524C je nakreslen na obr. 8.

Protože zesilovače a můstek potřebují pro spolehlivou funkci být napájeny vstupním napětím, byl navržen zdroj symetrického sta-



Obr.8 Návrh obvodu zapojení plošného spoje 4x zesilovač AD 524C



Obr.9 Návrh obvodu zdroje vstupního napájení

bilizovaného napětí pro napájení obvodů zesilovače a zdroj stabilizovaného napětí pro napájení tenzometrických můstků.

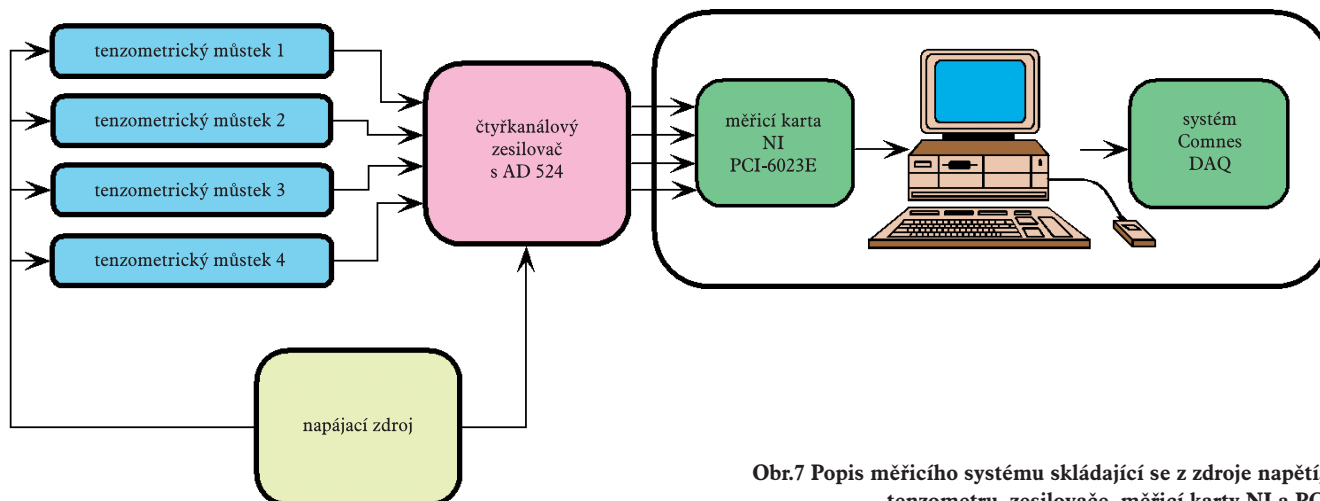
Vlastní návrh desky plošného spoje zesilovače a napájecích obvodů byl realizován v software Eagle (obr. 9) a obě desky plošných spojů mají stejnou velikost a jsou umístěny ve stínících krabíčkách přímo v těle snímače.

Poté proběhlo utěsnění deformačních čel silikonem pro zabránění vniknutí prachových částic sypké hmoty dovnitř základu a realizace zapojení na měřicí kartu (obr. 10).

Snímání napěťového stavu sypké hmoty pomocí 3D snímače

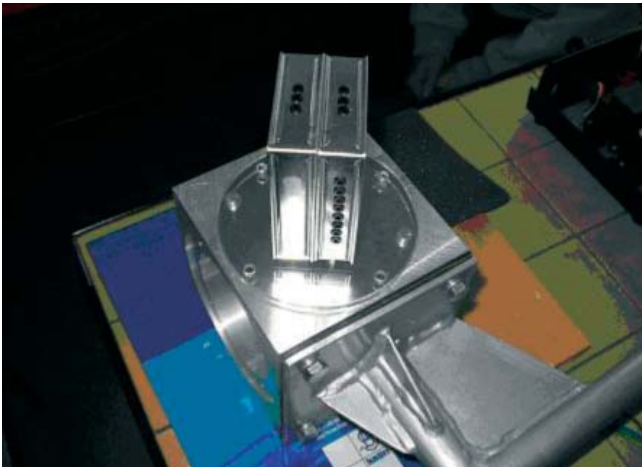
Napěťový stav sypké hmoty, tzn. velikost a charakter působícího napětí na element sypké hmoty v skladovacím systému je možné zachytit a přesně identifikovat pomocí 3Dimenzionálního snímače. Velikost napětí (tlaku) na čelo deformačního detektoru je napětí sypké hmoty v daném místě. Při kalibraci těchto deformačních detektorů, tzn. vystavení různým napětím a sledování jejich deformace, lze sestavit kalibrační křivku a následně přesně přiřadit zachycené zesílené deformaci (V) jednotlivých čel velikost normálových napětí (Pa).

Při umísťování snímače (obr. 11) do těla skladovacího zařízení je nezbytné, aby snímač byl umístěn v hlavních směrech os x, y a z , tak aby byla splněna podmínka přesné identifikace hlavních nor-

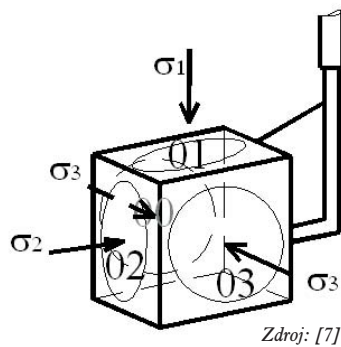


Obr.7 Popis měřicího systému skládající se z zdroje napětí, tenzometru, zesilovače, měřicí karty NI a PC





Obr.10 Konstrukce a uzavření zesilovačů do schránky



Zdroj: [7]

Obr.11 Konstrukce 3D snímače napětí (vlevo) se zobrazením označení 4 tenzometrů, tj. 4 měřicích kanálů

málových napětí σ_1 , σ_2 , σ_3 v hlavních směrech os kartézského souřadnicového systému.

Za účelem přesného snímání napětí tenzometrů na deformačních čelech 3D snímače byl použit měřicí systém Comnes DAQ od fy. Consynea, spol. s r.o. Tento systém je schopný s přesností 0,001 V~1 Pa identifikovat napětí na deformačních čelech 3Dimenzionálního snímače.

Měřicí systém pro snímání a zpracování signálů: COMNES DAQ, Consynea, spol. s r.o

Měřicí systém Comnes DAQ od fy. Consynea, spol. s r.o. společně s použitím měřicí karty National Instrument slouží pro laboratorní účely ke zpracování měřených signálů. Systém se skládá z měřicí karty umístěné v PC, ke které se připojují s pomocí svorkovnice snímače měřených fyzikálních veličin (obr. 7) a vývoje-

vého softwarového prostředí (obr. 12). Tyto prostředky zajišťují sběr a archivaci naměřených dat, jejich analýzu a prezentaci.

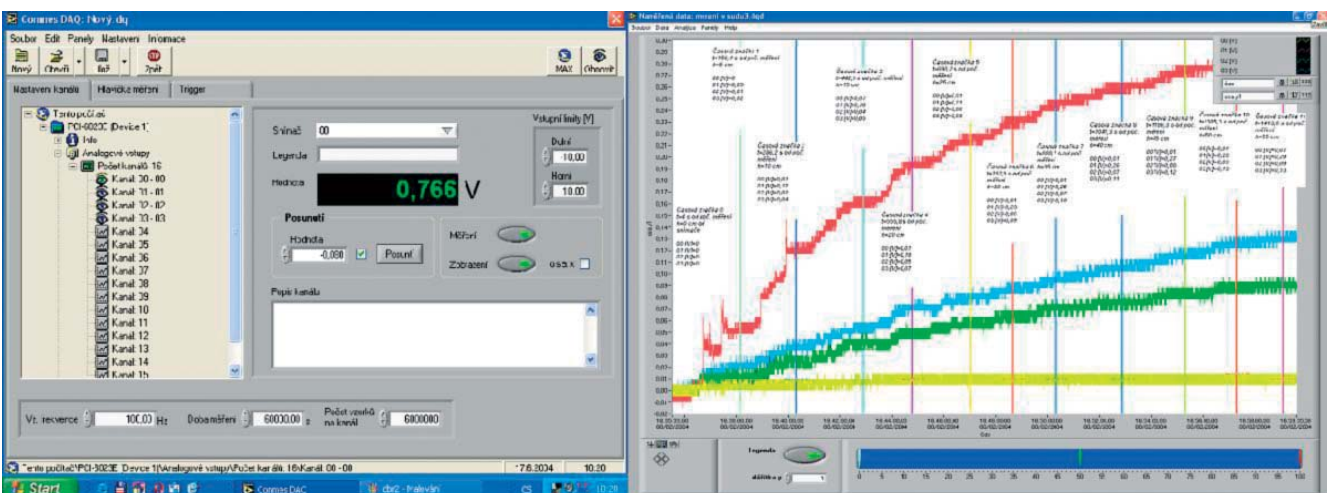
Kalibraci a aktuální zobrazení jednotlivých signálů, kde jejich počet je dán kapacitou karty (pro náš případ byla použita karta NI PCI-6023E = 16 analogových vstupů) je možné realizovat v základním zobrazovacím okně SW Comnes DAQ (obr. 12). Zobrazení všech signálů, analýza a další zpracování záznamů ze signálů, jejich integrace, apod. je možné na základě grafického zobrazení ve stejném vývojovém prostředí.

Měření sypké hmoty – šterku pomocí 3D snímače

Za účelem ověření správnosti teoretických úvah o napětovém stavu sypké hmoty, porovnání dosavadní teorie a praxe, bylo realizováno zkoumání napětového stavu na šterku. U tohoto vzorku byly zjištěny geometrické vlastnosti (částicová distribuce a morfologie) a mechanicko-fyzikální vlastnosti (úhel vnitřního tření, smyková pevnost, tokový faktor, apod.) v Laboratorii sypkých hmot při VŠB-TU Ostrava pod vedením Doc. Ing. Jiřího Zegzulky, CSc.

Při samotném vyšetřování napětového stavu zkoumaného materiálu v dané hloubce byl zkonstruován 3Dimenzionální snímač ponořen do malého modelu síla o rozměrech $\varnothing 353 \times 650$ mm a postupně zasypáván zkoumaným materiálem, přičemž byla zaznamenávána a zpracována data z měřicích detektorů deformace (obr. 12) a sledována hladina materiálu vzhledem k poloze celého snímače. Výsledkem zkoumání je porovnání dosavadních používaných metod Rankinea (1867) a Janssena (1895) a 3D napětového stavu v souladu s rozvíjenou teorií.

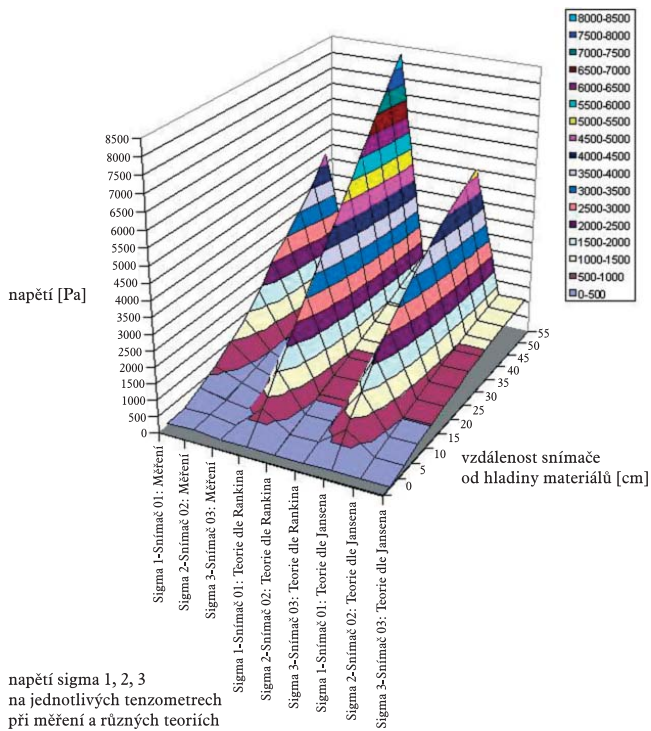
Šterk patří mezi nejzákladnější a nejrozšířenější materiály, používané ve stavebnictví. Pro svoji povahu partikulárního složení, kdy částicová distribuce se nachází v širokém rozsahu, má šterk tendenci k samozpevňování a zajištění vysoké pevnosti ve spojení s dalšími pojivovými materiály. Tento efekt je způsobem zaplněním meziprostor velkých zrnků celou škálou rozličných malých částic. Navíc efekt převážně ostrých tvarů pískových zrn zajišťuje perfektní morfologii vhodnou ke zajištění pevnosti. Byla stanovena hodnota sypné hmotnosti $\rho_s = 1560 \text{ kg.m}^{-3}$ pro zkoumaný vzorek šterku. Z výsledků měření (obr. 12) je patrný zásadní vliv geometrie modelu síla na boční tenzometry 00, 02 a 03 (obr. 13). Zjištěné hodnoty měření napětí jsou ovlivněny především konstrukcí modelu 3D snímače. Uvedené změřené hodnoty napětí šterku pro jednotlivé tenzometry jsou porovnány s teoretickými hodnotami v grafu na obr. 13. V grafu (obr. 13) se promítá také citlivost jednotlivých tenzometrů.



Vývoj SW-Consynea, spol. s r.o.

Obr.12 Vývojové prostředí COMNES DAQ pro snímání 4 signálů od 3D snímače





napětí sigma 1, 2, 3
na jednotlivých tenzometrech
při měření a různých teoriích

Obr.13 3D graf vzájemných normálových napětí šterku zaznamenaných na 3D snímači

Závěr

Porovnáním teoretických hodnot vyjádřených analyticky v obr. 13 dle Rankinea (1867) [2] a Janssenova (1895) [1] se skutečnými hodnotami napětí naměřených na jednotlivých snímačích 00, 01, 02 a 03 (obr. 12) vyplývá relativně dobrý soulad blížíci se teorii Janssenova (1895, [1]). Tato teorie [1] zohledňuje přesněji vliv geometrie skladovacího zařízení zvláště pro případy, kdy výška zásobníku H je 8 až 10x menší než hydraulický poloměr výpustného otvoru t_j , $h \leq (8 \text{ až } 10) \cdot R$ a vliv mechanicko-fyzikálních vlastností skladovaných hmot ve formě koeficientu sypnosti k a úhlu vnitřního tření skladované sypké hmoty φ [5]. U těchto teorií ovšem nejsou zohledněna další velice podstatná kritéria jako geometrické vlastnosti sypkých hmot, tj. částicové složení, tvarovitost, dále vlivy okolního prostředí jako vlhkost, teplota [5], kontaktní elektrostatische jevy, apod.

U všech experimentálních měření je patrná tendence vyjádřit rovnici závislosti normálového napětí σ_1 , σ_2 nebo σ_3 v mocninovém tvaru $\sigma = C_1 \cdot h^2 + C_2 \cdot h$ s chybou dost podstatně se lišící v závislosti na citlivosti jednotlivých snímačů v nastavených v příslušných směrech. Nejpresnější je rozptýl měřené hodnoty napětí od analyticky vyjádřené hodnoty u měření šterku na snímači 01 (směr σ_1). Toto je částečně způsobeno velkou citlivostí snímače, což bylo kompenzováno měřením na snímači 03 (také směr σ_3).

Lze tedy říci, že měření je tím přesnější, čím je zatížení větší a citlivost menší. Nehledě na to, že u napětí σ_2 a σ_3 se vyskytly stěnové efekty, které částečně zkreslily měření.

Obecně lze říci, že uvedené změřené hodnoty odpovídají přesněji Janssenově teorii [1] pro šterk.

Tento příspěvek vznikl za přispění Grantové agentury České republiky (GAČR) v rámci grantu č. 101/03/D039.

Literatura

- [1] JANSSEN, H., A.: Versuche uber Getreidedruck in Silozellen, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1895, p. 1045-1049.
- [2] RANKINE, W., J., M.: A Manual of Civil Engineering. 5th edn., Griffin, TE. R. Gerstein Library, London, 1867.
- [3] SLÍVA, A.: Sledování napětového stavu sypké hmoty pomocí 3Dimenzionálního (tříosového) snímače. ES Ostrava: VŠB-TU Ostrava-Fakulta strojní, 2004, ISBN 80-248-0629-0.
- [4] SLÍVA, A.: The 3Dimensional Indicator for a Silo Stress/Pressure Measurement, iCEER 2004. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Olomouc 2004, CD, p. 763 – 768, ISSN 1562-3580.
- [5] ZEGZULKA, J.: Mechanika sypkých hmot, ES Ostrava: VŠB-TU Ostrava-Fakulta strojní, 2004, ISBN 80-248-0699-1.
- [6] ZEGZULKA, J., KOVAL, L., SLÍVA, A.: The Mass and Central Flow in Bulk Material, 5th International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1996, p. 515 – 523. ISBN 80-7078-349-4.
- [7] www.hbm.cz

Aleš Slíva

Fakulta strojní
Institut dopravy
Laboratoř sypkých hmot
e-mail: ales.sliva@vsb.cz
<http://www.lsh.vsb.cz>

Aleš Oujezdský Lukáš Martinák

Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky
VŠB-Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, ČR
e-mail: ales.oujezdsky@vsb.cz
lukas.martinak@vsb.cz

