

## Model kontinuálního měření zhutnění

Článek pojednává o možnostech využití inteligentních metod při řízení stavebních strojů. Podrobněji je rozebráno zejména 3D řízení na bázi GPS (DGPS) v kombinaci s dosažením dostačné míry zhutnění na základě on-line informací o stavu podloží z kontaktního nedestruktivního měření při kontinuálním pohybu stroje.

Do oboru strojů pro stavbu komunikací patří několik různých mechanizmů, které významně či jen zanedbatelně ovlivňují výslednou kvalitu stavebního tělesa. Do první skupiny se řadí mimo finišerů zejména hutnické technika reprezentovaná v současnosti převážně vibračními válcí.

Vztah mezi hutnickou technikou a konečnými parametry komunikace je dán lokalizací stavby (respektive umístěním v rámci terénu) a rovnoměrností zhutnění, a to jak podkladových vrstev, tak především horních vrstev (krytu) vozovky.

Aby vibrační válec splňoval kvantitativní a především kvalitativní požadavky procesu stavby, například asfaltových vozovek a speciálních ploch, je vhodné jej vybavit subsystémy zajišťujícími v souladu s obr. 1 zejména:

- precizní 3D lokalizaci v rámci tělesa stavby,
- schopnost určit míru zhutnění přetvářeného podloží on-line.

V současné době se využívají tyto subsystémy jen omezeně a většinou nekomplexně.

### LOKALIZAČNÍ SUBSYSTÉM

Pro precizní lokalizaci jsou výrobci stavebních strojů (Bomag, Ammann,...) v současnosti využívány systémy GPS, případně DGPS, kdy je signál zpřesněn sdílením referenční stanice, se kterou stroj komunikuje např. přes GSM.

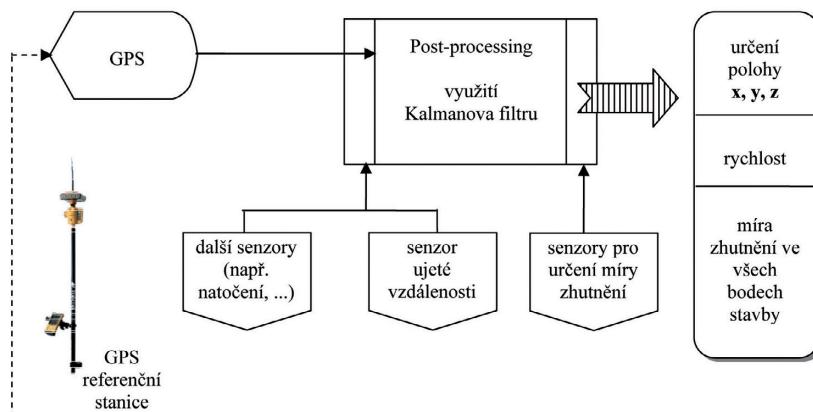
Efektivnější kombinací je GPS doplněný matematickým aparátem Kalmanova filtru, tj. schopný zpřesnit informace z GPS při výpadku nebo zhoršení signálu (viz obr. 1 – ve shodě s [6]). Schéma na obrázku tak popisuje diferenciální GPS, který je dále doplněný o vstupy z palubních snímačů (rychlosť,...) potřebný pro korektní aktualizaci modelu stavby a pohybu stroje pomocí Kalmanova filtru.

### MĚŘENÍ MÍRY ZHUTNĚNÍ

S ohledem na požadavek on-line informace o vlastnostech přetvářeného materiálu se pro hutnické techniku nedají využít konvenční metody měření, jako jsou např. Proctorova zkouška nebo dynamická talířová zkouška a mnohé další kontaktní metody. Mezi nejjednodušší běžně užívané metody tak patří srovnávání velikostí zrychlení nebo amplitudy běhounu a získá se tak relativní informace o podloží, která se dá v kombinaci s počáteční kalibrací brát za absolutní. Problémem u této metody je možné ovlivnění odskoku běhounu podkladem pod hutněnou vrstvou. Pokud se snímá zrychlení běhounu a tento signál se upraví vhodnou matematickou operací (např. Fourierova transformace), je možné získat hodnoty korelující s mírou zhutnění [2]. Jedná se například o údaj nazývaný CMV (Compaction Meter Value):

$$CMV \approx \frac{a(2\omega_0)}{a(\omega_0)} \quad (1)$$

Na vztah (1) přímo navazuje i další ukazatel stavu zhutnění podloží – hodnota RMV, která vychází z poměru amplitud na poloviční budící frekvenci ku amplitudě na budící frekvenci a je charakterizována jako mezní hodnota objevující se při „odskoku“ běhounu [2]:



Obr. 1 – Schéma vibračního válce s měřicími subsystémy

$$RMV \approx \frac{a(0,5\omega_0)}{a(\omega_0)} \quad (2)$$

Dalším možným údajem definujícím míru zhutnění je hodnota OMV (Oscilometer values) vycházející ze signálu horizontálního zrychlení vibrujícího běhounu [2]:

$$OMV = \left| \frac{da}{dt} \cdot t_{per} \right| : a = 0 \quad (3)$$

Získáme-li informace o podloží, lze volitelně měnit parametry vibračního následujícího pracovního přejezd, je-li stroj vybaven zařízením pro vyhodnocení a uchování těchto dat, a v konečném důsledku je možné dosáhnout vyšší jakosti výsledného povrchu za současného rovnoměrného zhutnění materiálu.

Z experimentálního měření a srovnání on-line informací (viz výše) s kontaktními metodami určení míry zhutnění (radiační ruční přístroj) byl prokázán shodný trend v průběhu jednotlivých přejezdů, ale docházelo k výchylkám vzniklým zejména ovlivněním podloží.

Ke zpřesnění informace o stavu hutněného materiálu je efektivně využít měření podloží, které je nezávislé na pracovním mechanizmu stroje. Jak ukazují práce zaměřené na využití bezkontaktních technologií [3], nejsou tyto metody dostačně přesné a jednoduše použitelné pro pracovní prostředí vibračních válců.

### VYVÁŽENÁ KOMBINACE SUBSYSTÉMU VÁLCE

Aby bylo možné provést srovnání technologií a systémů periferických zařízení osazovaných na kontinuálně pracující vibrační válec, byla provedena hodnotová analýza. Celkově dosažené ohodnocení pak vychází ze vztahu:

$$celkove_hodnoceni = \sum_{i=1}^8 hodnota_i (10 \div 100) \cdot hodnotova_vaha_i \quad (4)$$

kde jednotlivé hodnotové váhy vycházejí z experimentálního zkoumání a z dostupných informačních zdrojů. Každá z hodnot má z důvodu přesného hodnocení rozsah bodů v intervalu 10–100 a následně je provedena korekce hodnotovou vahou. Hodnoty jsou stanoveny takto: určení míry zhutnění a výsledná homogenita zhutněného materiálu (0,35); systém a kvalita lokalizace stavebního stroje v rámci stave-

niště a stavebního tělesa (0,21); náročnost přípravy staveniště a jeho udržování (0,12); míra návratnosti nákladů na instalaci dodatečných zařízení (0,10); druhý pracovních režimů stroje a režimů obsluhy (0,07); uživatelský komfort systému, náročnost na obsluhu stroje (0,07); komunikace s dalšími stroji na stavění (0,05); ostatní přidané vlastnosti, univerzálnost, vedlejší náklady (0,03). Jak vyplývá z předchozího, je nejvyšší váha přiřazena stavu hutněného materiálu a lokalizaci stroje v rámci staveniště, což tvoří dohromady přes 50 % váhy všech hodnocených kritérií. Zbylé hodnoty pak mají doplňující váhu.

Na základě takto nastavené analýzy vyhází jako ideální kombinace vibrační válec s určováním míry zhubnění před a po aktuálním přejezdu běhou (běhou), lokalizace DGPS s Kalmanovým filtrem a s možností řídit se podle datového modelu staveniště a s možností vzájemné komunikace s dalšími stavebními stroji, které pracují současně na souvisejících pracích, kdy se pro co nejpřesnější údaje o podloží použije mimo klasického frekvenčního i kontaktní měření.

Pro možnost kontaktního kontinuálního měření byl navržen krovový mechanizmus znázorněný na obr. 2, kdy se pohyb neodvozuje od stroje, ale je vyvzorován jen přitisknutím měřicího přístroje k měřenému materiálu pomocí speciálního rámu. Maximální dráha rámu  $s_m$  odpovídá maximální rychlosti stroje a času měření (kontaktu)  $t_m$ :

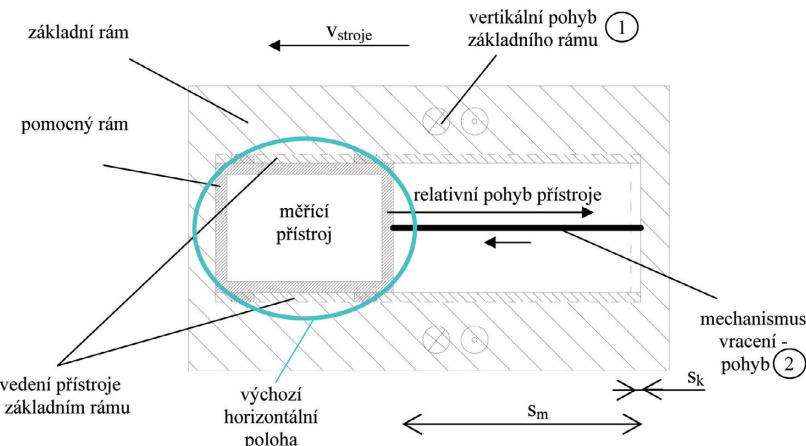
$$s_m = v_{stroje} \cdot t_m + s_k \quad (5),$$

kde  $s_k$  je seřizovací konstrukční rezerva. Měření je v souladu s obr. 2 realizováno dvěma základními pohybami:

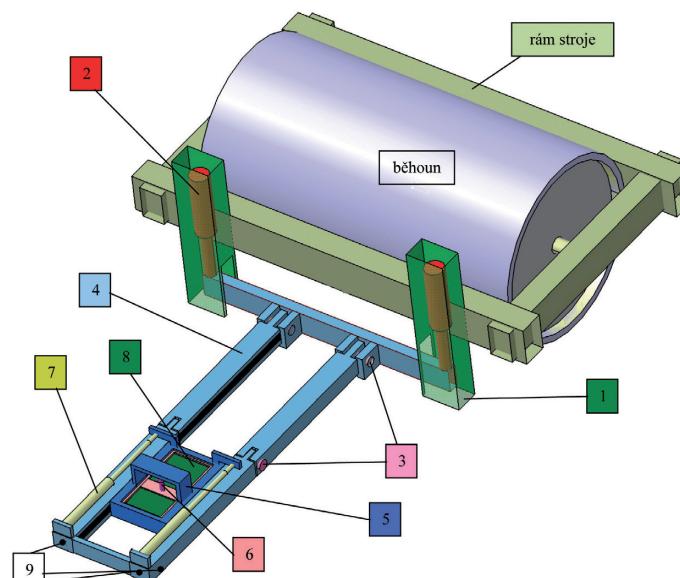
- 1) rychlé vertikální přitlačení rámu (měřicího přístroje) ke snímanému povrchu a následné oddálení do výchozí vertikální polohy,
- 2) po přesunu měřicího přístroje ve směru relativního pohybu a zvednutí od povrchu materiálu se musí přístroj vrátit do výchozí horizontální polohy.

Schéma fyzické realizace této synergické soustavy válec a měřicího rámu jsou znázorněny na modelu obr. 3, kde jsou naznačeny základní mechanizmy a uspořádání jednotlivých komponentů – pro názornost je zde znázorněn jen přední měřicí rám, zadní je proveden analogicky, jen zrcadlově otočen. Tato soustava se v souladu s obr. 3 skládá z následujících funkčních celků:

- 1) kotevní rám, který je pevně připojen k rámu stroje a obsahuje v sobě vedení pro připojení lyžiny měřicího rámu,
- 2) zdvižové přímočaré pneumotory (nebo hydromotory), s jejichž pomocí je možné vyrovnávat nerovnosti měřeného povrchu ve vertikálním směru; propojuje kotevní rám a lyžinu měřicího rámu,
- 3) aretace kloubu,
- 4) lyžina měřicího rámu včetně kluzného vedení (viz schéma na obr. 2),
- 5) pohyblivý pomocný rám pro usazení měřicího zařízení,
- 6) přímočarý pneumotor pro rychlý zdvih měřicího zařízení v rámci pomocného rámu,



Obr. 2 – Schéma krovového měření za pohyb stroje měřicím rámem



Obr. 3 – Umístění měřicího rámu na válec

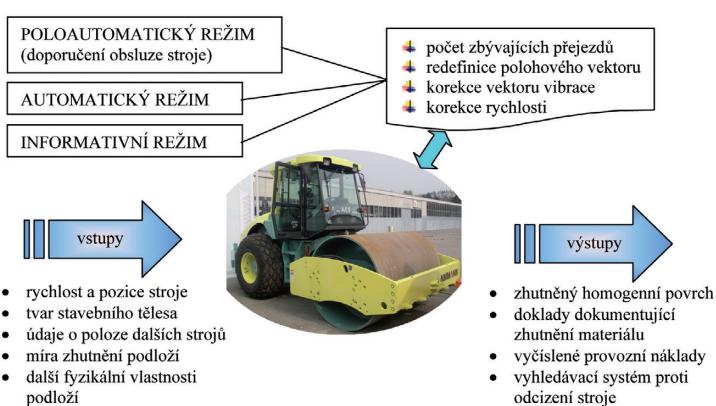
- 7) přímočarý pneumotor realizující zpětný horizontální pohyb pomocného rámu,
- 8) měřicí zařízení – v tomto případě Pavetracer,
- 9) ultrazvukové bezpečnostní senzory zabranující kolizi rámu s měřeným povrchem respektive s překážkami kolem tělesa stavby.

Při využití tohoto způsobu měření bude výstupem síť obdélníků, na něž se rozdělí těleso stavby, a jejichž šířka je dána příčným rozměrem hutního běhou a délka koresponduje s hodnotou  $s_d$ , která je dána součtem délky měření  $s_m$  a délky manipulačního času  $t_h$  potřebného pro návrat do výchozího polohy a času nutného na vertikální pohyb  $t_{ramuV}$  (přitisknutí a zvednutí měřicího kompletu k (od) měřenému materiálu). Délkový rozměr měřeného obdélníku tedy odpovídá vztahu:

$$s_d = s_m + v_{stroje} \cdot (t_h + 2 \cdot t_{ramuV}) \quad (6).$$

Každý z těchto clusterů má pak přiřazenu hodnotu odpovídající míře zhubnění a s využitím některé z metod lokalizace stroje se tato informace doplní i o polohový vektor.

Při osazení měřicího rámu na vibrační válec Ammann, jehož maximální rychlosť je  $10 \text{ km/h}$  ( $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ ) a pracovní rychlosť při hut-



Obr. 4 – Procesní schéma inteligenčního hutnícího stroje

nění je  $0,5 \div 1 \text{ m.s}^{-1}$  ( $v_{stroje}$ ) a za předpokladu doby měření při použití elektromagnetického zařízení na měření hustoty asfaltového povrchu Pavetracer,  $t_m = 1 \text{ s}$ , vychází dráha potřebná na měření sm přibližně 1 m a délka měřeného pole  $s_d$  je pak v závislosti na reálných rychlostech obslužných pohybů 1 až 1,5 m. To znamená, že uvedené zařízení se dá využít jen v kombinaci se stávajícím systémem měření stavu hutněního materiálu.

## ZÁVĚR

Při volbě druhu jednotlivých subsystémů a jejich technologických principů byla současně s procesem výběru aplikována i metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis = Analýza možností vzniku vad a jejich následků) v zkrácené (vnitřní autokorekční) variantě. Tzn., bylo využito FMEA jako racionalizačního prostředku, který umožnil ještě před realizací provést rozbor slabých míst (systému, konstrukce nebo procesu) a tím se včas vystříhat neocekávaných potíží.

Jako technologicky a technicky vyvážená verze vibračního válce byla vyhodnocena soustava obsahující systém schopný automaticky nebo

poloautomaticky (dle vědomé volby režimu) reagovat na informace o stavu hutněního podloží a to v každém místě tělesa stavby. Stroj dále umožňuje respektování a řízení se v souladu s datovým modelem stavby. Tzn., že měřicí systémy budou propojeny se systémy řídícími a předpokládá se tak automatické řízení parametrů tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností hutněního materiálu, které byly definovány v projektové dokumentaci. V rámci celého staveniště je stroj dále schopen komunikovat (sdílet informace) s dalšími stroji, které pracují na souvisejících operacích (další hutnící stroje, finišery). Taktto vybavený vibrační válec má dále jasné a názorné ovládací rozhraní (MMI) a jeho pracovní výkon a přesnost prováděných prací se vyznačuje akceptovatelnými zvýšenými pořizovacími náklady. Datový tok a schematické propojení vstupních a výstupních dat takto navržené soustavy odpovídá obr. 4.

Praktická realizace výše popsáné mechatronické soustavy vyžaduje souběžnou kalibraci a korekci všech nově osazených i stávajících sub-systémů, a z tohoto hlediska je velmi časově náročná. O možné stavbě prototypového zařízení se v současné době jedná s významným světovým výrobcem stavebních strojů.

*Ing. Michal Vaverka,*

*yvaver00@stud.fme.vutbr.cz,*

*doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.,*

*skopan@fme.vutbr.cz,*

*Ústav automobilního a dopravního inženýrství*

*Fakulta strojního inženýrství VUT Brno*

## RECENZE

Príspevok po formálnej stránke obsahuje všetky požadované náležitosti, je zrozumiteľný, jednotlivé časti majú logickú následnosť a je doplnený prehľadnými ilustračnými obrázkami a informáciou o použitej literatúre. Zaobrába sa problematikou on-line merania miery z hutnenia pri vytváraní stavebného telesa. Autor popisuje stanovenie ideálnej kombinácie vibračného valca s určovaním miery z hutnenia pred a po aktuálnom prejazde s možnosťou kontaktného kontinuálneho merania. Popisuje praktickú aplikáciu mechatronického zariadenia uloženého na meracom ráme pre vibračný válec od firmy Amman. Predložený článok predstavuje efektívnu metodologiu, ktorú možno po odskúšaní v spolupráci s výrobcom vibračných valcov aj prakticky využiť. Z predloženého textu je zrejmé, že jeho autor má teoretické poznatky a tiež skúsenosti z vytvárania meracích zariadení. Článok pre jeho teoretický a tiež praktický prínos odporúčam uverejniť.

*prof. Ing. Ladislav Gulan, PhD.,  
Strojnícka fakulta STU v Bratislavе*

## LITERATURA:

- [1] Kašpar, M., Vošťová, V.: Lasery ve stavebnictví a navigace strojů, ČKAIT Praha 2001, ISBN 80-86364-61-5
- [2] Briaud, J.-L., Seo, J.: Intelligent Compaction: Overview and Research Needs, Texas A&M University, 2003
- [3] Jaselskis, J., Han, H., C., Grigas, J.: Status of Roller Mountable Micro-wave Asphalt Pavement Density Sensor, Journal of Construction Engineering and Management, 2001
- [4] Pokorný, J., Vaverka, M., Kašpárek, J.: Regulace a automatizované systémy řízení hutnící techniky, In Stavební technika 4/2007
- [5] Peyret, F., Jurasz, J., Carrel, A., Zekri, E., Gorham, B.: The Computer Integrated Road Construction Project, Automation in Construction, vol. 9, pag. 447-461, 2000
- [6] Jurasz, J., Kley, K., L.: A Cost-Effective Positionning Solution for Asphalt Rollers Based on Low-Cost DGPS Receivers, University of Karlsruhe, 2003

**Ing. Michal Vaverka**

Absolvoval Fakultu strojního inženýrství VUT v Brně. Je studentem doktorského studijního programu na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně. Od roku 2007 je zaměstnán ve ŠKODA AUTO a. s.

**doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.**

Od roku 1981 pracuje na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Po celou dobu své profesní kariéry se věnuje problematice vývoje stavebních a dopravních a manipulačních strojů. Od roku 2003 je vedoucím odboru transportních a stavebních strojů Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně. Je autorem řady publikací v domácím i zahraničním tisku.

## Model of Continual Measurement of Compaction

This paper deals with the possibility of use intelligent methods in construction machines control. There is in detail described especially 3D control based on GPS (DGPS) in combination with achievement of sufficient degree of compaction on the basis of on-line information about conditions of subsoil. This information is obtained from contact nondestructive measurement during continual machine movement.