

REGULATION OF VIBRATING ROLLER PARAMETERS IN PROCESS OF COMPACTING COHESIVE AND NONCOHESIVE SOILS

J. Kašpárek¹, M. Škopán²

Summary: *This paper deals with problem of automatic reading, evaluation and control of direction of compacting force of roller with unidirected vibratory vector in interaction with cohesive or noncohesive soil. There is interconnection of electronic diagnostic system with mechanical regulable parameter of roller - vibrating vector. Parameter of soil compaction intensity is optimized with respect to achievement of specific density of compacting ground. There were used knowledge from experimental measuring, analytic and numeric simulation for solution of this problem.*

1. Úvod

Současný trend vývoje hutnicích strojů je směřován ke zvýšení výkonnosti a spolehlivosti, což v konečné míře má za následek zlepšení produktivity v procesech hutnění. Technologický a konstrukční rozvoj strojů je orientován zejména na optimalizaci geometrie, kinematiky a dynamických účinků pracovních částí na přetvářený materiál, který je převážně heterogenního charakteru a stochastických vlastností. Tento vývoj je v poslední době uplatňován také u ostatních stavebních strojů s kontinuálním způsobem práce. Jednou z cest novodobého moderního vývoje je tvorba a implementace mechatronických řídicích systémů, schopných v reálném čase reagovat na značnou materiální a fyzikální proměnnost pracovního prostředí a případně určovat kvalitativní gradient následných pracovních stavů. Dynamicky působící síly vznikající při práci hutnicí techniky, jako interakce běhounu válce s materiálem podloží, mají takřka výhradně stochastický charakter.

2. Stanovení míry zhutnění

V současnosti je hutnění zeminného či živičného podloží výhradně prováděno vibračními válci, ve kterých je hutnicího účinku dosahováno setrvačnou hmotností otáčejících se nevyvážek budiče vibrací. Otázka optimalizace hutnicího procesu je z pohledu

¹ Ing. Jaroslav Kašpárek, Ústav dopravní techniky FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, kasperek@fme.vutbr.cz, tel.: 541 142 432

² Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc., Ústav dopravní techniky FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, skopan@fme.vutbr.cz, tel.: 541 142 427

technologického založena na minimalizaci doby hutnění, minimalizaci počtu hutněních přejezdů a zároveň zaručení požadované míry zhutnění. Této problematice se v současnosti intenzivně věnují takřka všichni světoví výrobci hutnické techniky. Z dosavadního vývoje je zřejmá volba metody, která má vést ke stanovení míry zhutnění hutněného podloží s co nejpřesnějším způsobem zjištění stavu. Do pozadí jsou proto v dnešní době zatlačovány metody klasické, laboratorního typu, které měří požadované vlastnosti staticky na vybraném místě a převážně na konci hutnického procesu, tedy off line. Ty slouží jako metody referenční a při kontrolním stanovení míry zhutnění již hotového povrchu.

V současném středu zájmu jsou metody, které umožňují popsat okamžitý stav hutněného podloží pod pracujícím vibračním běhounem – on line. Tyto metody značně zvyšují efektivitu procesu hutnění a umožňují jak okamžitou reakci obsluhy stroje, tak i možnost automatické regulace stroje s ohledem na stav hutněného podloží a to bez vlivu lidského faktoru.

Rozhodujícím faktorem pro regulaci průběhu hutnického procesu je korektní a rychlá analýza míry zhutnění pod vibračním běhounem.

Pro stanovení míry zhutnění jsou používány dvě poněkud odlišné metody – relativní a absolutní. Metody relativní poskytují informaci o relativní míře zhutnění, tzn. systém porovnává diferenci hodnot naměřených ve dvou po sobě následujících hutnických přejezdech. Absolutní metody měření míry zhutnění stanovují stav podloží fyzikální veličinou typu měrná hmotnost, tuhost nebo modul pružnosti hutněného podloží.

3. Metody stanovení míry zhutnění on line

Problematice zjišťování míry zhutnění bylo ze strany rozhodujících světových výrobců hutnické techniky věnováno v posledních letech značné úsilí. Uspokojivých a obecně přijatelných výsledků bylo dosaženo jak rozsáhlým výzkumem v oblasti procesů zhutňování soudržných i nesoudržných podloží, tak také trvalým rozvojem počítačové techniky.

K relativnímu způsobu zjišťování stavu zhutnění patří i často užívané metody označované jako CCC (Continuous Compaction Control). Tyto metody jsou založeny na nepřetržitém měření průběhu vertikálního, příp. i horizontálního zrychlení vibračního běhounu. Z naměřeného průběhu zrychlení je na základě on line statistického zpracování stanovována míra zhutnění. Tato hodnota je okamžitě a průběžně zobrazována obsluze stroje, která pak rozhodne, zda je zhutnění dostatečné nebo zda je nutno provést další hutnické přejezdy.

Naměřené hodnoty jsou u různých výrobců odlišně značeny a zařízení je rozdílně programováno. Jeden z předních výrobců označuje hodnotu udávanou na měřicí aparatuře jako CMV (Compaction-Meter-Value) [1] vztahem:

$$CMV = \frac{a(2 \times \omega)}{a(\omega)} \times 300 \quad (1)$$

kde

$a(2 \cdot \omega)$... amplituda vertikálního zrychlení na dvojnásobné frekvenci

$\sim a(\omega)$... amplituda vertikálního zrychlení na základní frekvenci

300 ... multiplikační konstanta

Podle velikost CMV je následně stanoveno, zda je podloží pod vibračním válcem dostatečně zhutněné.

Další výrobce pro měření zhutnění zemin využívá hodnotu „Omega“. Princip je odlišný a spočívá zčásti na přesně zadaných statických parametrech válce. Zrychlení vibračního běhounu je měřeno ve dvou vzájemně kolmých směrech. Dále je pak z velikostí naměřených zrychlení, známé hodnoty hmotnosti vibračního běhounu i nevyvážku budiče vibrací a velikostí statické i dynamické síly vypočtena velikost reakční síly hutnění zeminy F_s [2].

$$F_s = F_{\text{stat}} + F_z - m \cdot a \quad (2)$$

kde

F_{stat} je statická síla od části hmotnosti válce připadajícího na jeden běhoun

F_z je síla budiče vibrací

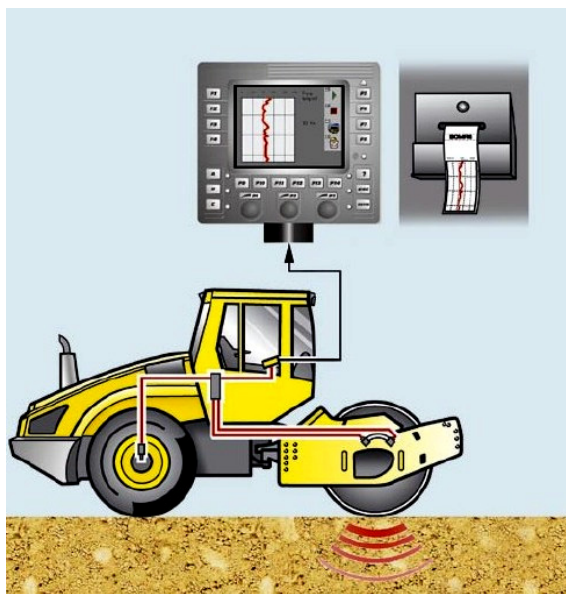
m hmotnost vibrujícího běhounu

a ... akcelerace běhounu

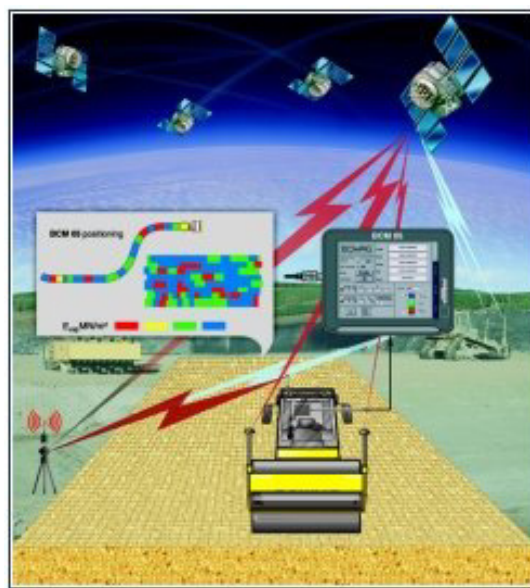
Z této hodnoty a průběhu zrychlení je vypočtena velikost pružné deformační energie W_{eff} (jako část z celkové energie), která byla přenesena do hutněného podloží vibračním běhounem. Hodnota E_{vib} je pak stanovena v přímé úměře ke zjištěné velikosti pružné deformační energie (obr. 1) [3] daná vztahem:

$$E_{\text{vib}} = 1,5r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} = 1,5r \cdot \frac{F_s}{\pi r^2 s} \quad (3)$$

Následně pak naměřené a vypočtené hodnoty postoupí samoregulačnímu hutnícímu systému, který pak rozhoduje o kombinaci výše uvedeného a který během hutnění automaticky koriguje amplitudu vibrace. Při hutnění si obsluha může nastavit několik úrovní požadovaného zhutnění.



Obr. 1: Posuzování zhutnění metodou „Omega“



Obr. 2: Využití GPS a DGPS při hutnění

Další výrobci dodávají do svých strojů systémy obdobných principů s rozšířenou možností regulačních parametrů. Jedná se např. o elektromechanický regulační systém, který řídí velikost amplitudy a frekvence vibrace podle okamžité kvality hutněného podloží. Základní princip spočívá v regulaci hutnící energie v závislosti na tuhosti hutněného podloží. Budič vibrací automaticky mění jak geometrický parametr nevývažku, tak také velikost budící frekvence podle rezonanční frekvence zeminy.

Jako velmi perspektivní se ukazuje využití GPS, resp. DGPS, při vyhodnocování míry zhutnění podloží v závislosti na poloze stroje na staveništi. Lze tak přehledně a přesně vyjádřit jak pro potřebu obsluhy vibračního válce, tak zejména pro dokumentaci výsledného rozložení míry zhutnění celé hutněné plochy. Zde se pro stanovení míry zhutnění v jednotlivých místech hutněné plochy opět vychází z odezvy vibračního běhounu. Předpokládá se, že mechanická energie účinku vibračního válce je úměrná fyzikálním vlastnostem (tuhosti) hutněného materiálu (obr. 2).

4. Fyzikální podstata hutnění a regulační parametry hutnění

Fyzikální podstatou procesu hutnění je zvyšování objemové hmotnosti vrstvy podloží, které je složeno z několika materiálových složek. Je to samotná zemina, voda a vzduch. Zvyšování objemové hmotnosti je docilováno vytlačováním vzduchových pórů, kapilárně vázané vody a stabilnějším uspořádáním částic zeminy. Proces hutnění je z hlediska fyzikálního silně nelineární úloha, daná právě heterogenitou materiálu podloží a kontaktní interakcí ocelového běhounu a podloží. V jistém matematickém přiblížení lze však analyticky modelovat samotný proces jako soustavu složenou z hmotnostních, tuhostních a tlumících prvků (obr. 3). Pak je možno vyjádřit proces hutnění pomocí soustavy Lagrangeových pohybových rovnic, které vyjadřují vztah mezi danými modelovými prvky a směrovou příp. úhlovou výchylkou.

Pohybová rovnice vyjádřená v maticovém tvaru pak je

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F}(\mathbf{t}, \varphi) \quad (4)$$

kde

$\mathbf{M} \dots$ je matice hmotností v modelové dynamické soustavě

$\mathbf{B} \dots$ je matice tlumících prvků v modelové dynamické soustavě

$\mathbf{K} \dots$ je matice tuhostí v modelové dynamické soustavě

Po úpravě můžeme vyjádřit regulační parametry při hutnění

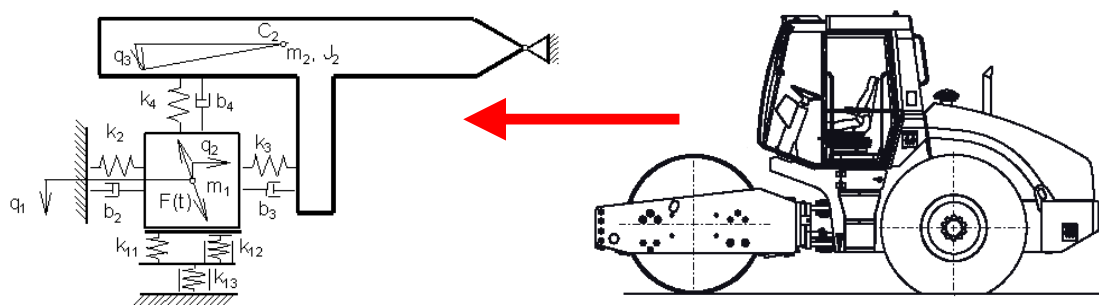
$$\ddot{\mathbf{q}} + 2 \cdot \mathbf{b}_p \cdot \Omega \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega^2 \cdot \mathbf{q} = \frac{\mathbf{F}(\mathbf{t}, \varphi)}{\mathbf{M}} \quad (5)$$

kde

$\Omega \dots$ je vlastní úhlová frekvence netlumené soustavy

$\mathbf{b}_p \dots$ je poměrný útlum

$\mathbf{F}(\mathbf{t}, \varphi) \dots$ hutnící síla, jako funkce časová a úhlová



Obr. 3: Dynamický model tahačového vibračního válce

Z uvedené pohybové rovnice jsou zřejmé parametry, jejichž regulace ovlivňuje proces hutnění zemin soudržného i nesoudržného charakteru. Jsou však parametry, které lze regulovat jen v omezeném intervalu, nebo nelze z konstrukčních důvodů regulovat vůbec.

Parametr Ω je vlastní úhlová frekvence netlumené dynamické soustavy a je dána pracovní frekvencí vibračního běhounu. Její hodnotu lze regulovat pouze omezeně jako násobek základní pracovní frekvence. Její hodnota prakticky odpovídá rezonanční frekvenci hutněného materiálu, čímž se docílí změny polohy zrn do stabilnějších poloh. Tento parametr lze jen omezeně regulovat plynule.

Parametr b_p je poměrný útlum, což je veličina stanovující dosažení míry zhutnění v daném místě. Slouží tedy jako kontrolní parametr při vyhodnocování stavu zeminy pod vibračním běhounem.

Parametr $F(t, \varphi)$ je hutnicí síla, která je funkcí časovou a úhlovou. Pokud při hutnění budeme uvažovat usměrněnou vibraci, je časová funkce dána pracovní frekvencí vibračního budiče a funkce úhlová je dána schopností měnit úhel směru působení vektoru hutnicí síly na podloží. Tento parametr je pro regulaci vhodný.

5. Modelování procesu hutnění

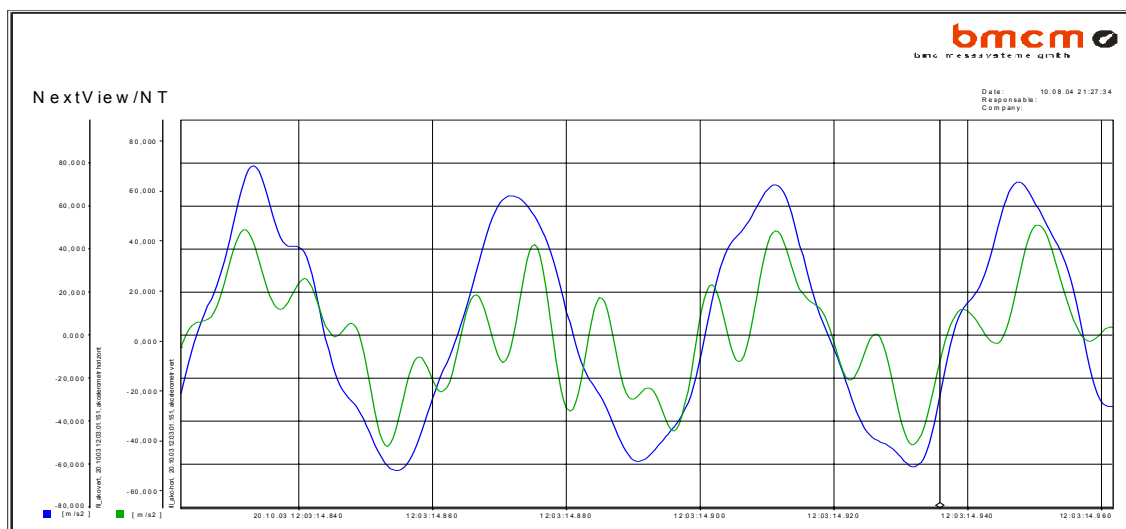
Modelování a simulace jsou v dnešní době nejčastěji prováděny metodou konečných prvků (MKP). Metoda je s rozvojem výpočetní techniky velmi rozšířená a je přesnější a rychlejší než analytická metoda zjišťování fyzikálních stavů těles a procesů. I přesto je však analytická metoda vhodnější pro okamžité vyhodnocování a řízení procesu hutnění. Metoda konečných prvků je velmi náročná na výpočetní kapacitu počítače, slouží k celkem přesnému popisu fyzikálního děje při procesu hutnění, neslouží však k operativnímu řízení tohoto procesu.

Proces hutnění je z pohledu MKP kontaktní úloha, kde tělesa v modelu mají přesně definované plastické, elastické, frikční, kinematické a další fyzikální vlastnosti. Z modelu procesu hutnění v programu MKP je možno zjistit energetickou náročnost, časově deformační vlastnost a konečnou míru zhutnění a tu porovnat s výsledky experimentální zkoušky.

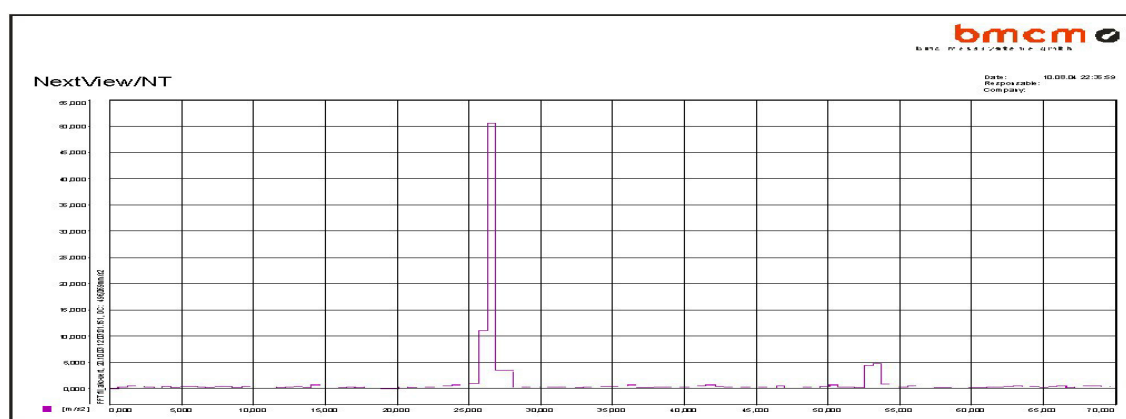
Běhoun válce je pro svoji lineární zatěžovací schopnost po celé šířce běhounu (kromě okrajů běhounu) zjednodušen na rovinné těleso s rozměrovými parametry vibračního válce. Model vrstvy zeminy má parametry jemného kameniva a definované okrajové podmínky dynamické úlohy. Model byl zatížen silovými účinky, tedy statickou tíhou připadající na jeden běhoun a hutnicí silou od vibračního budiče, která má sinusový tvar usměrněné vibrace.

Ve výsledcích deformačních vlastností na hutněný materiál je důležitá především vertikální složka deformace (obr. 4 – Míra zhutnění při sklonu vektoru hutnicí síly 90° , obr. 5 – pro sklon vektoru hutnicí síly 15°). Z hlediska stanovení dynamických účinků na hutněné živičné podloží lze z tvaru vertikální deformace usuzovat i intenzitu zhutnění.

Z analyzovaných průběhů je zřejmé, že výskyt amplitud na frekvencích násobných vůči frekvenci základní charakterizuje vyšší tuhost hutněného podloží. Tyto amplitudy jsou patrné ve frekvenčních spektrech jak vertikálních tak i horizontálních zrychlení. Z hlediska stanovení dynamických účinků na hutněné podloží je však rozhodující průběh zrychlení vertikálního, z jehož tvaru spektra lze usuzovat i na míru zhutnění pomocí metody CMV.



Obr. 6: Průběh zrychlení běhounu ve vertikálním a horizontálním směru při směru 60° .



Obr. 7: Spektrální analýza vertikálního zrychlení pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT)

7. Závěr

Při vytvoření numerického modelu procesu hutnění zeminy běhounem vibračního válce, kde parametrem je proměnný úhel sklonu vektoru síly budiče, jsou patrné hodnoty hloubkové intenzity zhutnění i povrchové deformace vlivem tření běhounu o zeminu. Tyto předpoklady zjištěné počítačovou simulací jsou experimentálně ověřeny a potvrzeny. Dále jsou položeny dílčí závěry u výsledků zkoušek jednotlivých parametrických změn, které nám ukazují hodnotové směry chování zeminy do rozvahových podmínek logické části regulace. Dále pak analyzují stav napětí v zemině při hutnění.

Bylo zjištěno, že regulací sklonu hutnicí síly je dosahováno potřebné míry zhutnění a byla dosažena přibližně stejná intenzita zhutnění v dané vrstvě zeminy. Regulace podle naměřených a vypočtených hodnot přispěla ke zlepšení produktivity procesu hutnění.

Porovnáním výsledků analytického i numerického modelování procesu hutnění s experimentem jednoznačně vyplývá správnost teoretických předpokladů v případě možnosti přímého řízení samotného procesu hutnění zemin. Z hlediska provozních podmínek jde o

možnost efektivního a autonomního řízení s minimalizací energetické náročnosti při zvýšení kvality zhutnění.

8. Poděkování

Publikovaných výsledků bylo dosaženo za podpory ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, výzkumný záměr MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických soustav".

Published results were acquired using the subsidization of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, research plan MSM 0021630518 "Simulation modelling of mechatronic systems".

9. Literatura

[1] Geodynamik AB: *Control of compacting machine with a measurement of characteristics of the ground material*. Patent WO 95/10664

[2] Kloubert, H.J.: *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle als Beitrag zur Qualitätssicherung im Erd- und Straßenbau*. BOMAG GmbH, Boppard 1993

[3] Anderegg, R.: *Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern*. VDI Verlag. Düsseldorf 1998, 200 str., ISBN 3-18-314604-5

[4] White, D.: *Soil Compaction Monitoring Technology*. Iowa State University 2004