

URČENIE HMOTNOSTNÝCH CHARAKTERISTÍK MOBILNÉHO PRACOVNÉHO STROJA EXPERIMENTÁLNYM MERANÍM

doc. Ing. Jozef Kulka, PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva
Strojnícka fakulta, Technická univerzita
Letná 9, Košice
e-mail: jozef.kulka@tuke.sk

doc. Ing. Martin Mantič, PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva
Strojnícka fakulta, Technická univerzita
Letná 9, Košice
e-mail: martin.mantic@tuke.sk

Ing. Eva Faltinová, PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva
Strojnícka fakulta, Technická univerzita
Letná 9, Košice
e-mail: eva.faltinova@tuke.sk

Ing. Melichar Kopas, PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva
Strojnícka fakulta, Technická univerzita
Letná 9, Košice
e-mail: melichar.kopas@tuke.sk

Abstract

This article describes a methodology used for an experimental investigation of the mass characteristics in the case of the mobile working machines. There is presented in this article a theoretical base and consequently a measuring procedure, which is applied in order to determine the relevant mass characteristics, namely the centre of gravity and also the mass moment of inertia for the mobile working machines.

Key words: mass characteristics, centre of gravity, mass moment of inertia, mobile working machine

ÚVOD

Pri skúmaní dynamických vlastností mobilných pracovných strojov je potrebné poznať okrem iných základných parametrov dynamického modelu vozidla aj hmotnosť vozidla, polohu jeho ťažiska a momenty zotrvačnosti vzťahované ku hlavným centrálnym osiam zotrvačnosti. Výpočtové určovanie týchto parametrov z výkresovej dokumentácie je náročné a málo spoľahlivé v dôsledku komplikovaného tvaru jednotlivých agregátov.

Z tohto dôvodu sa hmotnostné charakteristiky mobilných pracovných strojov určujú experimentálne.

Hmotnosť vozidla je premenlivá veličina, ktorá sa zisťuje meraním u vozidla stojaceho na vodorovnej podložke. Je všeobecne známe, že celková hmotnosť vozidla je daná súčtom hmotnosti pohotovostnej a užitočnej, pričom pohotovostná hmotnosť sa skladá zo suchej (vlastnej) hmotnosti a z ostatnej hmotnosti.

Silové riešenia vozidiel vychádzajú z určenia polohy ťažiska. Z hľadiska fyzikálneho platí, že ťažisko telesa je myslený bod, v ktorom je sústredená celá hmotnosť telesa.

Poloha ťažiska vozidla charakterizuje rozloženie hmotnosti vozidla na jeho jednotlivé nápravy a má zásadný vplyv nielen na ťahové, ale aj na ekonomické vlastnosti vozidla.

Platí zásada, že u väčšiny vozidiel má byť ťažisko situované čo najnižšie, aby poloha ťažiska pri jednotlivých jazdných režimoch (priama ustálená jazda, akcelerácia, brzdenie, jazda na svahu) čo najmenej ovplyvňovala zaťaženie náprav a aby pri jazde v zákrute (pôsobenie odstredivých síl) nebola jazda nestabilná v dôsledku rozdielného zaťaženia kolies na jednej a druhej strane vozidla. Preto je potrebné pri navrhovaní vozidiel určiť polohu ťažiska najprv predbežne výpočtom a následne, pri skúškach už hotových vozidiel, túto polohu spresniť, resp. overiť experimentálne.

EXPERIMENTÁLNE URČENIE POLOHY ŤAŽISKA MOBILNÉHO PRACOVNÉHO STROJA

Ako už bolo povedané, pri určovaní polohy ťažiska vozidla, resp. mobilného pracovného stroja, je možné postupovať dvoma spôsobmi:

výpočtom

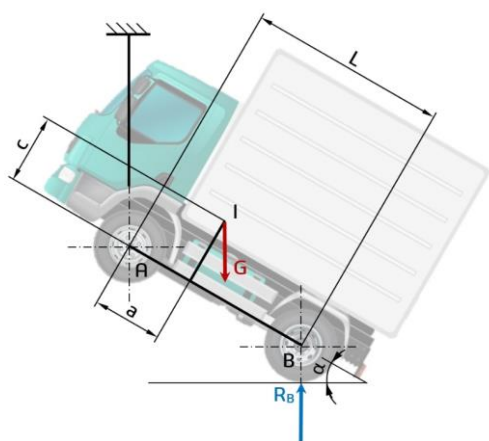
ak poznáme polohy ťažísk jednotlivých agregátov a ich hmotnosti, potom polohu ťažiska mobilného stroja vzhľadom ku ľubovoľne zvolenej osi je možné určiť výpočtom pomocou momentových rovníc. Zvyčajne sa vyjadruje rovnováha momentov k základným súradnicovým osiam. Princíp výpočtu spočíva v tom, že celková hmotnosť vozidla sa rozdelí na hmotnosti jeho základných konštrukčných celkov a zároveň sa zistia vzdialenosti pôsobísk týchto hmotností od súradnicových osí. Na základe toho sa následne zostavujú rovnice rovnováhy momentov jednotlivých ťažísk k súradnicovým osiam, z ktorých sa finálne vypočítajú súradnice

ťažiska vozidla. Tento postup je však značne náročný z hľadiska času aj pracnosti.

experimentálnym meraním

polohu ťažiska mobilného stroja je možné určiť jeho vážením na mostovej váhe. Presnosť merania závisí na presnosti váhy. Pri známych hodnotách rázvoru a rozchodu kolies je potrebné najprv vážiť celý mobilný stroj, potom zisťovať hmotnosť pripadajúcu na prednú a zadnú nápravu a hmotnosť pripadajúcu na pravú alebo ľavú stranu mobilného stroja. Takže celý postup experimentálneho merania je možné zhrnúť do štyroch krokov: a) meranie celkovej hmotnosti vozidla vo vodorovnej polohe, b) meranie hmotnosti jednotlivých náprav vo vodorovnej polohe tak, že jedna náprava stojí na váhe, c) meranie vo zdvihnutej polohe tak, že jedna náprava stojí na váhe, d) meranie vo vodorovnej polohe tak, že kolesá vozidla na jednej strane stoja na váhe.

Na obr.1 je uvedená výpočtová schéma experimentálneho merania pre určenie polohy ťažiska mobilného stroja.



Obr.1 Schéma merania polohy ťažiska mobilného stroja

Zisťovanie hmotnosti mobilného stroja, ktorá pripadá na zadnú nápravu (pre určenie reakcie R_B na zadnej náprave), je potrebné vykonať so zdvihnutou prednou nápravou v rôznych polohách (pod rôznymi uhlami sklonu). Predná náprava môže byť dvíhaná autožeriavom. Uhly sklonu zdvihnutia prednej nápravy od vodorovnej podložky je možné merať pomocou olovnice a posuvného meradla uhlov s desiatinným delením. Hodnoty reakcie R_B na zadnej náprave mobilného stroja sa zisťujú na mostovej váhe.

Podľa zjednodušenej schémy mobilného stroja vo zdvihnutej polohe (obr.1) odvodíme vzťah

pre výpočet výšky ťažiska od osi zadnej nápravy a vzdialenosť ťažiska od osi prednej nápravy.

Z momentovej podmienky rovnováhy k bodu A vyplýva

$$R_B b = G(d + e), \quad (1)$$

kde:

$$b = L \cos \alpha, \quad (2)$$

$$d = a \cos \alpha, \quad (3)$$

$$e = c \sin \alpha. \quad (4)$$

L - rázvor náprav (m),

a - pozdĺžna vzdialenosť ťažiska od osi prednej nápravy (m),

c - zvislá vzdialenosť ťažiska od osi zadnej nápravy (m),

G - tiaž mobilného stroja (N).

Dosadením vzťahov (2), (3), (4) do vzťahu (1) a následnou úpravou vyjadríme výsledný vzťah pre výpočet pozdĺžnej vzdialenosti ťažiska od osi prednej nápravy

$$a = L \frac{R_B}{G} - c \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Vzdialenosť a má byť pri rôznych uhloch sklonu mobilného stroja rovnaká. Je teda možné porovnať dve rôzne alebo dve po sebe nasledujúce merania.

Získame tak iteratívny vzťah pre výpočet pozdĺžnej vzdialenosti ťažiska od osi prednej nápravy nasledovne:

- pre i -te meranie platí

$$a = L \frac{R_{Bi}}{G} - c \cdot \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (6)$$

- pre $(i + 1)$ meranie

$$a = L \frac{R_{B(i+1)}}{G} - c \cdot \operatorname{tg} \alpha_{(i+1)}, \quad (7)$$

- porovnaním vzťahov (6) a (7) dostávame po úprave rovnicu pre zvislú vzdialenosť ťažiska od osi zadnej nápravy
-

$$c = \frac{\frac{R_{B(i+1)} - R_{Bi}}{G} L}{\operatorname{tg} \alpha_{(i+1)} - \operatorname{tg} \alpha_i} \quad (8)$$

Opakovaním merania získame súbor údajov, z ktorých štatisticky stanovíme výsledok vo forme strednej hodnoty a smerodajnej odchýlky. Potom platí:

- stredná hodnota pre zvislú vzdialenosť ťažiska od osi zadnej nápravy

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (9)$$

- smerodajná odchýlka pre zvislú vzdialenosť ťažiska od osi zadnej nápravy

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (10)$$

kde:

i – počet meraní, $i = 1, 2, \dots, n$.

Vzhľadom na nutnú podmienku existencie pozdĺžnej roviny symetrie u mobilných strojov môžeme predpokladať, že v priečnom smere sa ťažisko bude nachádzať vo vertikálnej rovine, prechádzajúcej stredom náprav.

EXPERIMENTÁLNE URČENIE HMOTNÉHO MOMENTU ZOTRVAČNOSTI MOBILNÉHO PRACOVNÉHO STROJA

Rovnako ako v predchádzajúcej kapitole, aj pri určovaní hmotného momentu zotrvačnosti mobilného stroja je možné postupovať dvoma spôsobmi, a to:

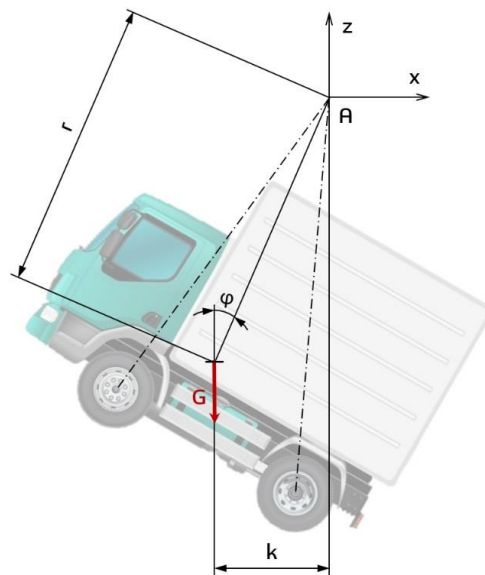
výpočtom

ak poznáme hmotnosti a rozmery jednotlivých agregátov a ich vzdialenosti ťažísk od zvoleného súradnicového systému, potom hmotný moment zotrvačnosti mobilného stroja je možné určiť výpočtom. Tento postup je prácny a náročný na čas.

experimentálnym meraním

tento spôsob spočíva vo vypočítaní skutočných hodnôt hmotných momentov zotrvačnosti z nameraných údajov na reálnom mobilnom stroji. Pri meraní je potrebné mobilný stroj zavesiť na žeriav a rozkmitať.

Na obr.2 je uvedená výpočtová schéma experimentálneho merania pre určenie momentu zotrvačnosti mobilného stroja.



Obr.2 Schéma merania momentu zotrvačnosti mobilného stroja

Pre zistenie hmotného momentu zotrvačnosti k hlavným centrálnym osiam zotrvačnosti mobilného stroja sa využíva princíp fyzikálneho kyvadla.

Pohybová rovnica pre dynamickú sústavu zobrazenú na obr.2 bude mať tvar:

$$\ddot{\varphi} + \frac{G \cdot k}{I_{yA}} = 0, \quad (11)$$

kde:

$$k = r \sin \varphi. \quad (12)$$

$\ddot{\varphi}$ – uhlové zrýchlenie (rad.s^{-2}),

G – tiaž mobilného stroja (N),

k – vychýlenie ťažiska od osi rotácie (m),

I_{yA} – hmotný moment zotrvačnosti mobilného stroja (kg.m^2),

r – vzdialenosť ťažiska od osi rotácie v bode A (m).

Po dosadení rov. (12) do rov. (11) môžeme pohybovú rovnicu pre dynamickú sústavu napísať v tvare:

$$\ddot{\varphi} + \frac{G \cdot r}{I_{yA}} \sin \varphi = 0. \quad (13)$$

Riešenie rov.(13) je v tvare

$$\varphi = A \sin \varpi_0 t + B \cos \varpi_0 t, \quad (14)$$

kde:

A, B – integračné konštanty,

ω_0 – vlastná kruhová frekvencia kývavého

pohybu ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$),

t – čas (s).

Podľa [1] bude vlastná kruhová frekvencia kývavého pohybu :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G \cdot r}{I_{yA}}} . \quad (15)$$

Dobu kyvu stanovíme zo vzťahu:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{yA}}{G \cdot r}} . \quad (16)$$

Z toho vyplýva, že hmotný moment zotrvačnosti sústavy k bodu A závesu je:

$$I_{yA} = \frac{T^2 \cdot G \cdot r}{4\pi^2} . \quad (17)$$

Hmotný moment zotrvačnosti skúmaného stroja k hlavnej centrálnej osi zotrvačnosti I_y získame aplikáciou Steinerovej vety

$$I_y = I_{yA} - \frac{G \cdot r^2}{g} . \quad (18)$$

Z uvedeného vyplýva, že pre zistenie veľkosti momentu zotrvačnosti je potrebné mobilný stroj rozkývať v rovine kolmej na vzťažnú os. Vhodným prostriedkom na túto operáciu je mostový žeriav s príslušnou nosnosťou a tuhosťou. Takáto manipulácia s bremenom však zaťažuje nosnú konštrukciu a mechanizmy žeriava. Pre elimináciu zotrvačných síl v krajných polohách rozkmitu je nutné podložiť pojazďové kolesá mosta a mačky žeriava klinovými zádržkami.

Vstupnými údajmi pre výpočet momentu zotrvačnosti sú:

- tiaž vozidla,
- poloha ťažiska vzhľadom na záves žeriava,
- perióda kývavého pohybu.

Periódu kývavého pohybu je možné merať viacerými známymi spôsobmi. Vhodné sú:

- meranie prechodu cez spodnú polohu kývavého pohybu pomocou svetelnej infračervenej brány spojennej s časovou základňou,
- digitálny záznam zrýchlenia pomocou akcelerometra,

vizuálne meranie času pomocou stopiek (presnosť merania v tomto prípade je ovplyvnená reakčnou schopnosťou pozorovateľa).

ZÁVER

Uvedená metodika zisťovania momentu zotrvačnosti vozidla bola použitá vo viacerých prípadoch [2]. Jej aplikácia sa ukazuje oveľa efektívnejšia a presnejšia ako prácny výpočet pomocou údajov z výkresovej dokumentácie.

Pri zavesení a zdvíhaní mobilného pracovného stroja je potrebné dávať pozor, aby lanový záves nepoškodil jeho karosériu. Je preto vhodné namontovať na kolesá pomocné predlžovacie konzoly, o ktoré sa upevní záves.

Pre meranie kývania stroja na lanovom závese je vhodné použiť žeriav, ktorého most má minimálne o jeden rád vyššiu tuhosť, ako je tuhosť závesu.

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantového projektu **VEGA 1/0528/20** Riešenie nových prvkov ladenia mechanických sústav.

Literatúra

- [1] Gonda, J.: *Dynamika pre inžinierov*. Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 1966
- [2] Izidor Mazurkiewicz, Ladislav Gulán, Gregor Izrael, Metod Glatz: *Mobilné pracovné stroje*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. ISBN 978-80-227-4190-3
- [3] Vaněk Antonín: *Moderní strojní technika a technologie zemních prací*. ACADEMIA, Praha, 2003
- [4] Apetaur M., Šalamoun Č.: *Motorová vozidla II*. ČVUT Praha, 1979
- [5] Oldřich Bureš a kol.: *Traktory a automobily*. Příroda, Bratislava, 1989
- [6] Novák, V., Zítek, P.: *Praktické metody simulace dynamických systému*. SNTL/ALFA, Praha, 1982