

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

zveřejněná podle § 31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2008-657

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

G01L 5/00 (2006.01)
G01L 1/18 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLUVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **23.10.2008**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **05.05.2010**
(Věstník č. 18/2010)

(71) Přihlašovatel:

Culek Bohumil Prof. Ing. CSc., Nové Jirmy, CZ
Malinský Jiří Ing., Praha 4, CZ

(72) Původce:

Culek Bohumil Prof. Ing. CSc., Nové Jirmy, CZ
Malinský Jiří Ing., Praha 4, CZ

(74) Zástupce:

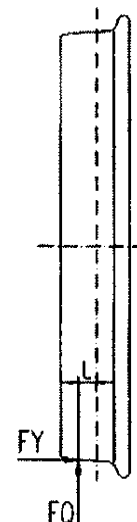
Loskotová & partneři Patentová a známková kancelář,
Ing. Jarmila Loskotová, K Závětinám 727, Praha 5,
15500

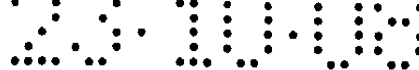
(54) Název přihlášky vynálezu:

**Systém měření silových účinků mezi kolem
kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě
kolejového vozidla a způsob měření silových
účinků**

(57) Anotace:

Pro systém měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla slouží jako měrný element standardní dvojkoli kolejových vozidel bez nutnosti jejich nevratných mechanických úprav. Měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla probíhá podle předpokladů a kroků uvedených v popisu. Měřicí systém je upevněn na disku měřeného kola, případně na nápravě, měrné elementy, tenzometry jsou instalovány pouze na jedné straně disku testovaného kola, jejich instalace není extrémně náročná na přesnost, nežádoucí parazitní vlivy teploty, odstředivé síly, polohy dotkového bodu, podélné-tangenciální síly, vlnovitost jízdní plochy kolejnic aj. jsou účinně kompenzovány, systém měření je použitelný pro železniční vozy pro rychlost do 250 km/h, přesnost měřicího systému v oblasti jmenovitých a limitních hodnot sil FQ a FY dosahuje hodnot lepších než 2,5 %, produktem je poloha L dotkového bodu kolo-kolejnice v šířce jízdní plochy kola.





Systém měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla a způsob měření silových účinků

Oblast techniky

Vynález se týká metody a systému měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla.

Výzkum měření silových účinků mezi kolem kolejového vozu a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla se provádí za účelem ověřování bezpečnosti proti vykolejení (BPV) kolejových vozidel.

Dosavadní stav techniky

Dosud vyvinuté principy měření silových účinků mezi kolem kolejového vozu a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla, využívají měrných dvojkolí pro zjišťování svislých a příčných sil působících mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla jsou založeny na tenzometrickém měření deformací disků kol kolejových vozidel, například

- měřicí systém národní společnosti Francouzských železnic (SNCF)
- švédský systém –Interfleet, patenty GO1L 5/16 (2006.1) a GO1L 5/20 (2006.1)
- italský systém
- systém Českých drah + Výzkumného ústavu železničního CZ patent 278 639

nebo na měření deformací nápravy dvojkolí, případně v kombinaci s deformací disku kola a deformací nápravy dvojkolí, například

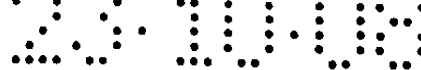
- Německá dráha (DB)

Měřené deformace jsou úměrné silám, které působí v kontaktu kolo – kolejnice. Oba principy se liší v umístění tenzometrických snímačů a ve způsobu jejich elektrického zapojení. Výsledkem jsou měřené elektrické signály, které po zesílení a úpravě a po kalibraci měřicího systému představují síly působící mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí.

Nevýhody :

Systém Německých drah je příliš složitý.

Systém Českých drah + VÚŽ má nevýhodu v tom, že získané elektrické signály z deformace disku kola kolejového vozidla mají nevhodné tvary – kolísavý periodický průběh během otáčky kola, což je nevhodné pro další zpracování, takže je nutné zavést do měřicího řetězce korekční činitel, který signály vyhlazuje - vyrovnává, upravuje. Měrné dvojkolí Českých drah + VÚŽ navíc vyžaduje úpravu kotoučů kol – vyvrtání otvorů v průměru 50 mm, k zesílení citlivosti měření sil působících mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí.



Zdokonalování stávajících principů a nalézání nových principů ke zjišťování sil působících mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí s ohledem na přesnost měření, respektive nejistoty měření, podléhá neustálému vývoji.

Ve všech případech těchto systémů se více či méně daří způsobem zapojení tenzometrů eliminovat negativní vlivy změny teploty, odstředivé síly, elektromagnetického pole vnějšího prostředí a další vlivy jako je např. geometrická nepřesnost nalepení tenzometrů. To vše dělá dosud používané metody a systémy měření sil mezi koly a kolejnicemi nepřesnými a proto je zde prostor pro neustálý výzkum a vývoj směřující k dokonalejším metodám a systémům měření.

Při posuzování BPV se jako hlavní kritérium bere v úvahu poměr příčných FY a svislých FQ sil, které působí mezi koly a kolejnicemi při jízdě vozidla. Jednotlivé principy se liší v umístění tenzometrických snímačů a ve způsobu jejich elektrického zapojení. Výsledkem jsou měřené elektrické signály, které po zesílení a úpravě a po kalibraci měřicího systému představují síly FY a FQ. Aplikací těchto měřicích systémů vznikají měřná dvojkolí (MD), která pak po zavázání pod nově stavěná nebo rekonstruovaná železniční vozidla slouží k ověřování jejich BPV v provozních podmínkách. Zdokonalování a nalézání nových principů zjišťování sil FY a FQ s ohledem na přesnost měření, respektive nejistoty měření, podléhá neustálému vývoji.

Podstata vynálezu řešení

Cílem vynálezu bylo vyvinout nový systém měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí a určení polohy dotykového bodu v šířce jízdní plochy kola kolejového vozu při jízdě kolejového vozidla.

Výsledkem experimentálního výzkumu je systém měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla, jehož podstatou je, že jako měrný element slouží standardní dvojkolí kolejových vozidel bez nutnosti jejich nevratných mechanických úprav.

Pro síly FQ a FY působící na železniční kolo v kontaktu s kolejnicí v místě, které se nachází ve vzdálenosti L od roviny styčné kružnice vyvolávají deformace disku kola. Za předpokladu, že deformace disku kola jsou v oblasti pružných deformací, platnosti Hookeova zákona, existuje jednoznačná závislost mezi deformací, respektive mechanickým radiálním napětím σ měřeným tenzometry v disku kola (obr. 2) a hodnotami veličin FQ, FY a L.

Tuto závislost lze popsat vztahem:

$$\sigma = FQ * (a * L + b) + FY * c \quad (1)$$

kde:

σ mechanické napětí na povrchu disku železničního kola při jízdě [MPa]

FQ vnější svislá kolová síla [kN]

FY vnější příčná kolová síla [kN]

L posunutí dotykového bodu na jízdní ploše [mm]

a, b, c konstanty.

V principu vynálezu se ke zjištění tří neznámých veličin FY , FQ , L změří tři hodnoty mechanického napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, které jsou vyjádřeny obdobnými rovnicemi (2) jako vztah (1) a přitom musí být splněna podmínka lineární nezávislosti těchto rovnic.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= FQ * (a_1 * L + b_1) + FY * c_1 \\ \sigma_2 &= FQ * (a_2 * L + b_2) + FY * c_2 \\ \sigma_3 &= FQ * (a_3 * L + b_3) + FY * c_3\end{aligned}\tag{2}$$

Podmínky lineární nezávislosti je docíleno vhodným umístěním tenzometrických snímačů, které měří napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Konstanty $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ se stanoví na základě hodnot napětí σ pro různé režimy zatížení silami FQ, FY a polohy L při kalibraci.

Konstanty a, b, c mohou být pro jedno místo kola stanoveny na základě zjištěných hodnot napětí σ , která byla vyvolána třemi rozdílnými hodnotami zatížení (viz obr. 3).

$$a = \left(\frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - \frac{\sigma_{L2}}{FQ_{L2}} \right) / (L_1 - L_2)\tag{3}$$

$$b = \frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - a * L_1\tag{4}$$

$$c = \frac{\sigma}{FY}\tag{5}$$

Při znalosti konstant $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ je možné, po dosazení změřených hodnot napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, stanovit on-line hodnoty působících sil FQ a FY i příčnou polohu dotykového bodu L .

Výsledkem měření a on-line zpracování měřených hodnot napětí σ je řešení soustavy rovnic (2), které je následující:

$$FQ = \frac{\sigma_1 * K_{Q1} + \sigma_2 * K_{Q2} + \sigma_3 * K_{Q3}}{b_1 * K_{Q1} + b_2 * K_{Q2} + b_3 * K_{Q3}}\tag{6}$$

příčemž

$$\begin{aligned} K_{Q_1} &= a_2 * c_3 - a_3 * c_2 \\ K_{Q_2} &= a_3 * c_1 - a_1 * c_3 \\ K_{Q_3} &= a_1 * c_2 - a_2 * c_1 \end{aligned} \quad (7)$$

resp.

$$FY = \frac{\sigma_1 * K_{Y_1} + \sigma_2 * K_{Y_2} + \sigma_3 * K_{Y_3}}{b_1 * K_{Y_1} + b_2 * K_{Y_2} + b_3 * K_{Y_3}} \quad (8)$$

příčemž

$$\begin{aligned} K_{Y_1} &= a_2 * b_3 - a_3 * b_2 \\ K_{Y_2} &= a_3 * b_1 - a_1 * b_3 \\ K_{Y_3} &= a_1 * b_2 - a_2 * b_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$L = \frac{\sigma_1 - (c_1 * Y) - (b_1 * Q)}{(a_1 * Q)} \quad (10)$$

Tento nový princip měření příčné kolové síly FQ a svislé kolové síly FY a polohy L kontaktního bodu mezi železničním kolem a kolejnicí v šířce jízdní plochy kola kolejového vozidla byl experimentálně ověřen na Testovacím zařízení železničních kol a při jízdě vozidla v běžném provozu.

Teoretické a experimentální opodstatnění

Pomocí speciálního testovacího zařízení železničních kol, které umožňuje vnášení vnějších zatěžovacích sil: FQ - svislé kolové síly a FY - příčné kolové síly v kontaktním dotykovém bodě mezi „rotující kolejnicí“, simulující jízdu po kolejnici a zkoušeným testovaným železničním kolem v libovolném místě v celé šířce jízdní plochy kola, byl tenzometricky změřen průběh mechanického napětí ve vybraných místech na povrchu disku kola.

Byla zjištěna závislost tohoto mechanického napětí σ na následujících veličinách:

- vnější svislá kolová síla FQ
- vnější příčná kolová síla FY
- natočení testovaného kola α
- posunutí dotykového bodu, „rotující kolejnice“ a testovaným železničním kolem, L v šířce jízdní plochy kola.

Dále byl zjištěn vliv tvaru kontaktní plochy A, bodový i plošný, působících sil FQ a FY na deformační odezvu disku kola.



Z naměřených dat bylo odvozeno, že průběh mechanického napětí na povrchu disku železničního kola v radiálním směru v místech dostatečně vzdálených od jízdní plochy (alespoň 30% poloměru kola), lze vyjádřit vztahem (1).

Rovnice vyjadřující mechanické napětí, na povrch disku kola, v radiálním řezu měřeného železničního kola na třech různých poloměrech / pro jeho tři různé poloměry/ mají tvar (2).

Pro praktické měření se umístění tenzometrických snímačů řídí následujícími zásadami:

- Tenzometry jsou nalepeny na jedné straně kola
- Tenzometry snímají deformace disku kola v radiálním směru
- Tenzometry jsou uspořádány na jedné kružnici
- Tenzometry umístěné na jedné kružnici („roztečná kružnice tenzometrů“) tvoří pravidelnou strukturu
- Tenzometry zapojené do Wheatstoneových můstků musí být na disku kola uspořádány s konstantní roztečí $\Delta\varphi$ (například při 8 můstcích $\Delta\varphi = 45^\circ$).
- Poloha (úhel) tenzometrů v jednom Wheatstoneově můstku musí být symetrická vůči střednici úhlu rozevření můstku.
- V každém můstku jsou zapojeny 4 aktivní tenzometry.

Struktura uspořádání, vzájemná poloha tenzometrů a jejich zapojení do Wheatstoneových můstků jsou voleny tak, aby

- byla zajištěna kompenzace účinků odstředivých sil,
- byla zajištěna kompenzace vlivů teplotních změn.

Všechny tenzometry v úplném Wheatstoneově můstku jsou aktivní a zapojeny podle obr. 4 a 5. Při změně teploty anebo odstředivé síly se napětí na tenzometrech v úplném můstku mění stejné a vliv těchto účinků je tak kompenzován.

K návrhu uspořádání tenzometrického systému na kole se používá výpočtový program.

Vstupními daty pro výpočet jsou:

- Napětí tenzometru, která byla zjištěna během kalibrace jednoho tenzometru. Na kolo bylo postupně působeno jednotlivými zatěžovacími silami $F_{Q_{L1}}$, $F_{Q_{L2}}$ und F_Y (obr. 3). Působíště sil se nachází v rozmezí $\alpha = 0 \div 360^\circ$ (obr. 4).
- Schéma uspořádání tenzometrů na desce kola a schéma zapojení tenzometrů do úplných můstků (příklad na obr. 5).



Výpočtový program umožňuje:

- Výpočet napětí můstků B_i (viz obr.7) při zatížení kola silami bei FQ_{L1} , FQ_{L2} a FY , a to pro polohu dotykového bodu v intervalu $\alpha = 0^\circ \div 360^\circ$.
- Výpočet hodnot součtů napětí můstků S_i (viz obr.7) při zatížení kola silami bei FQ_{L1} , FQ_{L2} a FY , a to pro polohu dotykového bodu v intervalu $\alpha = 0^\circ \div 360^\circ$.
- Výpočet hodnot konstant a , b , c na základě vztahů (3), (4) a (5).

Pro ideální systém platí:

$$Q = FQ, Y = FY, (x = L)$$

kde

Q , Y , x jsou výsledné veličiny, respektive jejich hodnoty vypočítané programem

FQ , FY , L ... jsou vnější nastavené veličiny, respektive jejich hodnoty .

Pomocí výpočtového programu se provádí volba vhodného uspořádání tenzometrických můstků. Kritériem pro tuto volbu je minimální citlivost signálů Q a Y na rušení signálů FQ a FY . Tato citlivost je verifikována pomocí výpočtu, a to pomocí umělého zavedení odchylky napětí mostu od jeho přesné hodnoty.

Cílem tohoto postupu je nalézt takové uspořádání tenzometrů na desce kola, při kterém jsou splněny následující podmínky:

- Pro směrodatné kombinace zatížení silami FQ , FY a polohy kontaktního bodu L vykazuje odezva systému dostatečně malou citlivost jednotlivých tenzometrů proti rušení (obr. 8),
- Výstupní signál můstku je dostatečně silný, aby byl zpracovatelný (dostatečný odstup signál-šum).

Rozhodující kombinace zatížení je taková kombinace, při které se při skutečném měření lze nejvíce přiblížit mezním hodnotám sledovaných parametrů.

Výsledkem popsané výpočtové analýzy je:

- Stanovení polohy tenzometrického měřicího systému na kole,
- Stanovení hodnot váhových koeficientů V , které budou použity při výpočtech hodnot U_1 , U_2 , U_3 .



Výpočet hodnot Q a Y a polohy L

K výpočtu hodnot signálů Q resp. Y na základě řešení soustavy rovnic (2) se používají místo napětí σ_1, σ_2 a σ_3 trojice hodnot napětí $U_{Q(1)}, U_{Q(2)}, U_{Q(3)}$, které vznikají jako lineární kombinace napětí dvojic mostů S_1, S_2, S_3, S_4 . Pro výpočet hodnot signálů Q resp. Y mohou být vybrány pro jednu polohu působíště sil různé trojice hodnot napětí $U_{Q(1)v}, U_{Q(2)v}, U_{Q(3)v}$, jejichž hodnoty jsou počítány na základě různých nezávislých lineárních kombinací napětí S_1, S_2, S_3, S_4 . Může tedy být vypočteno nezávisle několik hodnot Q_v, Y_v ($v = 1 \dots v_{\max}$). Výsledné hodnoty Q resp. Y jsou potom vypočteny jako střední hodnoty

$$Q = \frac{1}{v_{\max}} \sum_{v=1}^{v_{\max}} Q_v \quad (11)$$

resp.

$$Y = \frac{1}{v_{\max}} \sum_{v=1}^{v_{\max}} Y_v \quad (12)$$

Obecně platí, že pro výpočet jedné hodnoty Q jsou potřeba tři hodnoty U_{Qr} ($r = 1, 2, 3$)

$$U_{Qr} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * S_i \quad (13)$$

Resp. pro výpočet jedné hodnoty Y tři hodnoty U_{Yr} ($r = 1, 2, 3$)

$$U_{Yr} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * S_i \quad (14)$$

Výsledná hodnota Q_v je dána rovnicí

$$Q_v = \frac{U_{Q1v} * K_{Q1v} + U_{Q2v} * K_{Q2v} + U_{Q3v} * K_{Q3v}}{b_{UQ1v} * K_{Q1v} + b_{UQ2v} * K_{Q2v} + b_{UQ3v} * K_{Q3v}} \quad (15)$$

přičemž K_{Qr} a b_{UQr} ($r = 1, 2, 3$) jsou konstanty.

Konstanty K_{Qr} ($r = 1, 2, 3$) jsou dány vztahy

$$\begin{aligned} K_{Q1v} &= a_{UQ2v} * c_{UQ3v} - a_{UQ3v} * c_{UQ2v} \\ K_{Q2v} &= a_{UQ3v} * c_{UQ1v} - a_{UQ1v} * c_{UQ3v} \\ K_{Q3v} &= a_{UQ1v} * c_{UQ2v} - a_{UQ2v} * c_{UQ1v} \end{aligned} \quad (16)$$



přičemž a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou konstanty, které náleží napětím U_{Qrv} ($r = 1, 2, 3$).

Konstanty a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou počítány jako vážené součty konstant a_{Si} , b_{Si} , c_{Si} ($i = 1...4$), které jsou násobeny příslušnými váhovými koeficienty V_{Qriv} ($r = 1...3$). Konstanty a_{Si} , b_{Si} , c_{Si} náleží signálům S_i pro jeden měřicí řez a jsou zjištěny pomocí kalibrace. Obdobně jsou při kalibraci zjištěny konstanty i pro další měřicí řezy, kterých je nejméně osm.

Konstanty a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou počítány podle následujícího schématu:

$$a_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * a_{Si} \quad (17)$$

$$b_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * b_{Si} \quad (18)$$

$$c_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * c_{Si} \quad (19)$$

Analogicky k výpočtu hodnot Q_v je výsledná hodnota Y_v dána rovnicí

$$Y_v = \frac{U_{Y1v} * K_{Y1v} + U_{Y2v} * K_{Y2v} + U_{Y3v} * K_{Y3v}}{b_{UY1v} * K_{Y1v} + b_{UY2v} * K_{Y2v} + b_{UY3v} * K_{Y3v}} \quad (20)$$

přičemž

$$\begin{aligned} K_{Y1v} &= a_{UY2v} * c_{UY3v} - a_{UY3v} * c_{UY2v} \\ K_{Y2v} &= a_{UY3v} * c_{UY1v} - a_{UY1v} * c_{UY3v} \\ K_{Y3v} &= a_{UY1v} * c_{UY2v} - a_{UY2v} * c_{UY1v} \end{aligned} \quad (21)$$

a

$$a_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * a_{Siv} \quad (22)$$

$$b_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * b_{Si} \quad (23)$$

$$c_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * c_{Siv} \quad (24)$$

U měřého dvojkolí jsou výsledné hodnoty Q resp. Y počítány jako střední hodnoty ze 4 hodnot Q_v resp. Y_v .



$$Q = \frac{1}{4} \sum_{v=1}^4 Q_v \quad (25)$$

$$Y = \frac{1}{4} \sum_{v=1}^4 Y_v \quad (26)$$

Kalibrace kol měrného dvojkolí

Účelem kalibrace kol měrného dvojkolí je stanovit hodnoty konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1...4$ – číslo dvojice můstků, $m = 1...8$ – číslo měřicího řezu), které náleží signálům S_i dvojic mostů pro jednotlivé měřicí řezy.

Jednotlivá kola měrného dvojkolí jsou při kalibraci zatěžována silami stejným způsobem, který je znázorněn na obr. 3:

- Radiální silou FQ , která působí ve vzdálenosti L_1 ,
- Radiální silou FQ , která působí ve vzdálenosti L_2 (přičemž L_1 a L_2 jsou vzdálenosti dotykového bodu od vztažné roviny),
- Příčnou silou FY , která působí na poloměru R .

Zatěžování probíhá při kalibraci pouze v 8 polohách (pokud je nalepeno 8 tenzometrických můstků) $\alpha = 0^\circ$ až 315° s krokem 45° .

Určování konstant a , b , c probíhá ve dvou krocích, které jsou založeny na rovnicích (3), (4), (5).

Konstanty a , b , c jsou zjišťovány pro každou polohu, dle následujících kroků:

Krok	Zatížení	Okrajová podmínka	Rovnice
1	radiální silou FQ ve vzdálenosti L_1 radiální silou FQ ve vzdálenosti L_2	$FY = 0$	pro vyhodnocení konstant a a b jsou použity rovnice (3) und (4). $a = \left(\frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - \frac{\sigma_{L2}}{FQ_{L2}} \right) / (L_1 - L_2)$ $b = \frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - a * L_1$
2	příčnou silou FY_1 a radiální silou FQ ve vzdálenosti L_1 příčnou silou FY_2 a radiální silou FQ ve vzdálenosti L_1	$FQ = \text{konst.}$ $FQ > 0$	$c = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{FY_1 - FY_2} \quad (27)$

Postup podle kroku 2 bere v úvahu skutečnost, že na kalibračním stavu není možné realizovat zatížení silou FY za podmínky $FQ = 0$.



Výsledkem kalibrace je soubor 96 konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1...4$, $k = 1...8$) dvojic mostů S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , každý pár tvoří tenzometrické můstky uspořádané symetricky na disku kola, přičemž normála v dotykovém bodě je osou symetrie, pro úhly $\alpha = 0^\circ$ až 315° s krokem 45° (zvané poloha 1 až 8).

Identifikace polohy dotykového bodu na obvodu kola

Z předchozího textu vyplývá, že znalost polohy dotykového bodu na obvodu kola je základní podmínkou pro funkci tohoto systému. Rovnost mezi signály Q_v a hodnotou FQ , resp. mezi Y_v a hodnotou FY platí, když působí síly FQ a FY se nacházejí v rovině měřicího řezu. Poloha je určována ze signálů Q_1 až Q_4 na základě následujících podmínek:

- $\max(|Q_v|_{v=1...4}) - \min(|Q_v|_{v=1...4}) \leq \Delta Q_{lim}$ rozdíl mezi maximem absolutních hodnot signálů Q_1 až Q_4 a minimem absolutních hodnot signálů Q_1 až Q_4 je ve stejném časovém okamžiku než stanovená mezní hodnota (v ideálním případě jsou hodnoty signálů Q_1 až Q_4 stejné)
- současně se jedná o lokální extrém průběhu signálů $|Q_v|_{v=1...4}$ v čase (poznámka – to nastává pouze tehdy, když se tenzometrický měřicí systém dostane do polohy, kdy dva Wheatstoneovy můstky, jejichž signály se sčítají, se nacházejí v symetrické poloze oproti působení sil FQ a FY).

Průběh měření

Kontinuálně probíhá výpočet hodnot S_{im} , přičemž $i = 1...4$, $m = 1...8$.

Na základě hodnot S_{im} , hodnot kalibračních konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1...4$, $m = 1...8$) a váhových koeficientů $V_{Q_{rvi}}$ ($r = 1...3$ – pořadové číslo rovnice) jsou počítány hodnoty $U_{Q_{rim}}$, ze kterých jsou počítány hodnoty Q_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Q) resp. hodnoty $U_{Y_{rim}}$, ze kterých jsou počítány hodnoty Y_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Y).

V těch polohách otáčení kola, kde je splněna podmínka podle souměrnosti Wheatstoneových můstků tj. dotykový bod se nachází v měřicím řezu m , jsou počítány výsledné hodnoty Q_m a Y_m . Hodnota Q_m je počítána jako střední hodnota z hodnot Q_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Q , m = číslo měřicího řezu) a hodnota Y_m jako střední hodnota z hodnot Y_{vm} ($v = 1...4$ –



počet nezávisle počítaných hodnot Y , m = číslo měřicího řezu). Průměrování slouží k tomu, aby se zmenšil vliv chyb měření.

Výhody:

- měřicí systém je použitelný pro železniční kola hnáných i hnacích kolejových vozidel, respektive pro všechny běžné nově vyráběné tvary disků plných kol, rovinné, kuželové i zakřivené
- na měřném dvojkolí nemusí být prováděny žádné nevratné změny ovlivňující životnost a mechanickou pevnost, například vrtání o podobně
- měrné elementy, tenzometry jsou instalovány pouze na jedné straně disku testovaného kola, jejich instalace není extrémně náročná na přesnost.
- měřicí systém je upevněn na disku měřeného kola případně na nápravě
- k měření je možné ve většině případů použít dvojkolí přímo ze zkoušeného vozidla
- nežádoucí parazitní vlivy teplota, odstředivé síly, polohy dotykového bodu, podélné-tangenciální síly, vlnovitost jízdní plochy kolejnic a.j. jsou účinně kompenzovány
- systém měření je použitelný pro železniční vozy pro rychlost do 250 km/h
- přesnost měřicího systému v oblasti jmenovitých a limitních hodnot sil F_Q a F_Y dosahuje hodnot lepších než 2,5 %
- produktem je poloha L dotykového bodu kolo-kolejnice v šířce jízdní plochy kola.

Přehled obrázků na výkrese

Vynález je blíže objasněn na přiložených výkresech, kde

na obr. 1 je znázorněno kolo železničního vozidla a jeho zatížení,

na obr. 2 je znázorněno tenzometrické měření mechanického radiálního napětí σ v disku kola,

na obr. 3 je znázorněno působení sil při kalibraci,

na obr. 4 je znázorněna poloha tenzometru vůči působišti sil F_Q , F_Y ,

na obr. 5 je znázorněno schematické uspořádání tenzometrů na disku měřeného kola a označení tenzometrů zapojených do jednoho můstku 1 - 1', 2 - 2', 3 - 3', 4 - 4', 5 - 5', 6-6', 7-7', 8-8', přičemž znaménka +/- vyjadřují umístění příslušného tenzometru ve Wheatstonově můstku v souladu se schématem uspořádání tenzometrů na disku měřeného kola – na obr. 6.,

na obr. 7 je znázorněn příklad uspořádání tenzometrů na disku kola,

na obr. 8 je graficky znázorněna odezva signálu tenzometru resp. Wheatstonova můstku na vnější zatížení, která byla vypočtena pomocí výpočtové simulace,



na obr. 9 je schematicky znázorněn měření řetězec,
na obr. 10 je znázorněna funkce systému měření.

Příklad provedení technického řešení

Na každém kole měrného dvojkoľi je umístěn jeden tenzometrický měřicí systém, který sestává z 8 úplných Wheatstoneových tenzometrických můstků. Umístění tenzometrů a jejich uspořádání (poloměr „roztečné kružnice“ a úhel můstku) bylo určeno na základě výpočtové simulace pomocí modelu popsaného v předcházejících bodech.

Tenzometry jsou nalepeny s následujícími parametry :

- odchylka od poloměru „roztečné kružnice“ ± 1 mm
- odchylka od teoretické pozice na „roztečné kružnici“, měřená v obvodovém směru ± 1 mm (na poloměru 300 mm)
- úhlová odchylka polohy tenzometru od ideální radiální polohy $\pm 1^\circ$.

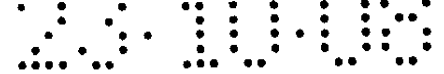
Měřicí řetězec (obr.9) instalovaný na každém kole je kromě 8 Wheatstoneových tenzometrických můstků dále vybaven 8 nízkošumovými měřicími zesilovači (zesílení nastavitelné 600÷2400), jedním signálovým procesorem (100 MIPS) s jedním 12-bitovým AD převodníkem ($f_s = 4000$ Hz/kanál). Bezdrátový přenos digitalizovaných dat se děje pomocí WiFi-Systému (2,4 GHz). Software procesoru je napsán v jazyce C. Celý systém je navržen tak, aby mohl být umístěn na kotouči kola anebo na nápravě. Systém je napájen z baterií nebo alternativně systém napájení induktivním, resp. napájením z alternátoru.

Funkce systému a účinnost metody je znázorněna na obr. 10.

Na uspořádání popsané a znázorněné na obr. 5, 6, 7 může být nahlíženo jako na „masku“, která je trvale spojena s dotykovým bodem kolo-kolejnice. Na otáčejícím se kole jsou umístěny Wheatstoneovy tenzometrické můstky č. 1 až č. 8. Pouze a jen tehdy, když poloha tenzometrických mostů na kole se ztotožní s „maskou“ poskytuje měřicí systém signály Q a Y. To nastává během jedné otáčky kola osmkrát.

Průmyslová využitelnost

Vynález se využije při ověřování bezpečnosti proti vykolejení nových a rekonstruovaných kolejových vozidel v rámci schvalovacích procesů uvádění těchto vozidel do provozu. Dále bude využíván výrobcí kolejových vozidel při jejich výzkumných činnostech v souvislosti s otázkou zvyšování bezpečnosti proti vykolejení kolejových vozidel jimi vyráběnými.



PATENTOVÉ NÁROKY

1. Systém měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla, vyznačující se tím, že jako měrný element slouží standardní dvojkolí kolejových vozidel bez nutnosti jejich nevratných mechanických úprav

2. Způsob měření silových účinků mezi kolem kolejového vozidla a kolejnicí při jízdě kolejového vozidla, kdy pro síly FQ a FY působící na železniční kolo v kontaktu s kolejnicí v místě, které se nachází ve vzdálenosti L od roviny styčné kružnice, vyvolávají napětí disku kola a za předpokladu že deformace disku železničního kola jsou v oblasti platnosti Hookeova zákona, lze jednoznačně vyjádřit závislost mezi radiálním napětím σ na povrchu disku kola a hodnotami veličin FQ , FY a L , vztahem :

$$\sigma = FQ * (a * L + b) + FY * c \quad (1)$$

kde:

σ radiální mechanické napětí na povrchu disku kola [MPa]

FQ vnější svislá kolová síla [kN]

FY vnější příčná kolová síla [kN]

L posunutí dotykového bodu na jízdní ploše [mm]

a, b, c konstanty zjištěné při kalibraci.

probíhá podle následujících kroků

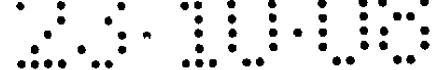
Krok první :

Ke zjištění tří neznámých veličin FY , FQ , L se změří tři hodnoty mechanického napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, které jsou vyjádřeny obdobnými rovnicemi (2) jako vztah (1) a přitom musí být splněna podmínka lineární nezávislosti těchto rovnic :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= FQ * (a_1 * L + b_1) + FY * c_1 \\ \sigma_2 &= FQ * (a_2 * L + b_2) + FY * c_2 \\ \sigma_3 &= FQ * (a_3 * L + b_3) + FY * c_3 \end{aligned} \quad (2)$$

přičemž podmínky lineární nezávislosti je docíleno vhodným umístěním tenzometrických snímačů, které měří napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, a konstanty $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ se stanoví na základě hodnot napětí σ pro různé režimy zatížení silami FQ, FY a polohy L při kalibraci, přičemž

konstanty a, b, c mohou být pro jedno místo kola stanoveny na základě zjištěných hodnot napětí σ , která byla vyvolána třemi rozdílnými hodnotami zatížení :



$$a = \left(\frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - \frac{\sigma_{L2}}{FQ_{L2}} \right) / (L_1 - L_2) \quad (3)$$

$$b = \frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - a * L_1 \quad (4)$$

$$c = \frac{\sigma}{FY} \quad (5)$$

Krok druhý :

Při znalosti konstant $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ je možné, po dosazení změřených hodnot napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, stanovit on-line hodnoty působících sil FQ a FY i příčnou polohu dotykového bodu L , potom výsledkem měření a on-line zpracování měřených hodnot napětí σ je řešení soustavy rovnic (2), které je následující:

$$FQ = \frac{\sigma_1 * K_{Q1} + \sigma_2 * K_{Q2} + \sigma_3 * K_{Q3}}{b_1 * K_{Q1} + b_2 * K_{Q2} + b_3 * K_{Q3}} \quad (6)$$

přičemž

$$\begin{aligned} K_{Q1} &= a_2 * c_3 - a_3 * c_2 \\ K_{Q2} &= a_3 * c_1 - a_1 * c_3 \\ K_{Q3} &= a_1 * c_2 - a_2 * c_1 \end{aligned} \quad (7)$$

resp.

$$FY = \frac{\sigma_1 * K_{Y1} + \sigma_2 * K_{Y2} + \sigma_3 * K_{Y3}}{b_1 * K_{Y1} + b_2 * K_{Y2} + b_3 * K_{Y3}}, \quad (8)$$

přičemž

$$\begin{aligned} K_{Y1} &= a_2 * b_3 - a_3 * b_2 \\ K_{Y2} &= a_3 * b_1 - a_1 * b_3 \\ K_{Y3} &= a_1 * b_2 - a_2 * b_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$L = \frac{\sigma_1 - (c_1 * Y) - (b_1 * Q)}{(a_1 * Q)} \quad (10)$$

Krok třetí :

Pro měření se umístění tenzometrických snímačů řídí musí být splněny následující zásady :

- tenzometry jsou nalepeny na jedné straně kola



- tenzometry snímají deformace disku kola v radiálním směru
- tenzometry jsou uspořádány na jedné roztečné kružnici Tenzometrů
- tenzometry umístěné na jedné roztečné kružnici tenzometrů tvoří pravidelnou strukturu
- tenzometry zapojené do Wheatstoneových můstků musí být na disku kola uspořádány s konstantní roztečí $\Delta\varphi$ (například při 8 můstcích $\Delta\varphi = 45^\circ$).
- pro eliminaci vlivu tangenciálních sil se sčítají signály dvojic můstků v postavení symetrickém vůči dotykovému bodu
- poloha (úhel) tenzometrů v jednom Wheatstoneově můstku musí být symetrická vůči střednici úhlu rozevření můstku.
- každý Wheatstoneový můstek se skládá zpravidla ze 4 tenzometrů, všechny tenzometry jsou aktivní,

přičemž struktura uspořádání, vzájemná poloha tenzometrů a jejich zapojení do Wheatstoneových můstků jsou voleny tak, aby

- byla zajištěna kompenzace účinků odstředivých sil
- byla zajištěna kompenzace vlivů teplotních změn

Krok čtvrtý

K návrhu uspořádání tenzometrického systému na kole se používá výpočtový program, přičemž vstupními daty pro výpočet jsou:

- napětí tenzometru, která byla zjištěna během kalibrace jednoho tenzometru, když na kolo bylo postupně působeno jednotlivými zatěžovacími silami F_{Q1} , F_{Q2} und F_Y
- působíště sil se nachází zpravidla v rozmezí $\alpha = 0 \div 180^\circ$
- schéma uspořádání tenzometrů na desce kola a schéma zapojení tenzometrů do úplných Wheatstoneových můstků

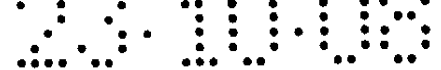
a výpočtový program umožňuje:

- výpočet napětí Wheatstoneových můstků B_i (viz obr.7) při zatížení kola silami F_{Q1} , F_{Q2} a F_Y , a to pro polohu dotykového bodu v intervalu $\alpha = 0^\circ \div 360^\circ$.
- výpočet hodnot součtů napětí Wheatstoneových můstků S_i (viz obr.7) při zatížení kola silami F_{Q1} , F_{Q2} a F_Y , a to pro polohu dotykového bodu v intervalu $\alpha = 0^\circ \div 360^\circ$.
- výpočet hodnot konstant a , b , c na základě vztahů (3), (4) a (5), když pro ideální systém platí:

$$Q = F_Q, Y = F_Y, (x = L), \text{ kde}$$

$Q, Y, x, \dots$ jsou výsledné veličiny, respektive jejich hodnoty vypočítané programem

$F_Q, F_Y, L, \dots$ jsou vnější nastavené veličiny, respektive jejich hodnoty a



pomocí výpočtového programu se následně provede volba vhodného uspořádání tenzometrických můstků, přičemž kritériem pro tuto volbu je minimální citlivost signálů Q a Y na rušení signálů FQ a FY , kdy tato citlivost je verifikována pomocí výpočtu, a to pomocí umělého zavedení odchylky napětí mostu od jeho přesné hodnoty, přičemž cílem tohoto postupu je nalézt takové uspořádání tenzometrů na desce kola, při kterém jsou splněny následující podmínky :

- pro směrodatné kombinace zatížení silami FQ , FY a polohy kontaktního bodu L vykazuje odezva systému dostatečně malou citlivost jednotlivých tenzometrů proti rušení
- výstupní signál můstku je dostatečně silný, aby byl zpracovatelný (dostatečný odstup signál-šum), přičemž

rozhodující kombinace zatížení je taková kombinace, při které se při skutečném měření lze nejvíce přiblížit mezním hodnotám sledovaných parametrů a výsledkem popsané výpočtové analýzy je :

- stanovení polohy tenzometrického měřicího systému na kole,
- stanovení hodnot váhových koeficientů V , které budou použity při výpočtech hodnot U_1 , U_2 , U_3

Krok pátý

Výpočet hodnot Q a Y a polohy L , kdy k výpočtu hodnot signálů Q resp. Y na základě řešení soustavy rovnic (2) se používají místo napětí σ_1 , σ_2 a σ_3 trojice hodnot napětí $U_{Q(Y)1}$, $U_{Q(Y)2}$, $U_{Q(Y)3}$, které vznikají jako lineární kombinace napětí dvojic mostů S_1 , S_2 , S_3 , S_4 . , přičemž pro výpočet hodnot signálů Q resp. Y mohou být vybrány pro jednu polohu působíště sil různé trojice hodnot napětí $U_{Q(Y)1v}$, $U_{Q(Y)2v}$, $U_{Q(Y)3v}$, jejichž hodnoty jsou počítány na základě různých nezávislých lineárních kombinací napětí S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , může tedy být vypočteno nezávisle několik hodnot Q_v , Y_v ($v = 1 \dots v_{\max}$) a výsledné hodnoty Q resp. Y jsou potom vypočteny jako střední hodnoty :

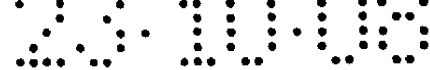
$$Q = \frac{1}{v_{\max}} \sum_{v=1}^{v_{\max}} Q_v \quad (11)$$

resp.

$$Y = \frac{1}{v_{\max}} \sum_{v=1}^{v_{\max}} Y_v \quad (12)$$

přičemž obecně platí, že pro výpočet jedné hodnoty Q jsou potřeba tři hodnoty U_{Qrv} ($r = 1, 2, 3$)

$$U_{Qrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * S_i \quad (13)$$



resp. pro výpočet jedné hodnoty Y tři hodnoty U_{Yrv} ($r = 1, 2, 3$)

$$U_{Yrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * S_i \quad (14)$$

A výsledná hodnota Q_v je dána rovnicí

$$Q_v = \frac{U_{Q1v} * K_{Q1v} + U_{Q2v} * K_{Q2v} + U_{Q3v} * K_{Q3v}}{b_{UQ1v} * K_{Q1v} + b_{UQ2v} * K_{Q2v} + b_{UQ3v} * K_{Q3v}} \quad (15)$$

přičemž K_{Qrv} a b_{UQrv} ($r = 1, 2, 3$) jsou konstanty, které jsou dány vztahy :

$$\begin{aligned} K_{Q1v} &= a_{UQ2v} * c_{UQ3v} - a_{UQ3v} * c_{UQ2v} \\ K_{Q2v} &= a_{UQ3v} * c_{UQ1v} - a_{UQ1v} * c_{UQ3v} \\ K_{Q3v} &= a_{UQ1v} * c_{UQ2v} - a_{UQ2v} * c_{UQ1v} \end{aligned} \quad (16)$$

přičemž a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou konstanty, které náleží napětím U_{Qrv} ($r = 1, 2, 3$), kde

konstanty a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou počítány jako vážené součty konstant a_{Si} , b_{Si} , c_{Si} ($i = 1...4$), které jsou násobeny příslušnými váhovými koeficienty V_{Qriv} ($r = 1...3$). Konstanty a_{Si} , b_{Si} , c_{Si} náleží signálům S_i pro jeden měřicí řez a jsou zjištěny pomocí kalibrace a obdobně jsou při kalibraci zjištěny konstanty i pro další měřicí řezy, kterých je nejméně osm, potom

konstanty a_{UQrv} , b_{UQrv} , c_{UQrv} jsou počítány podle následujícího schématu:

$$a_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * a_{Si} \quad (17)$$

$$b_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * b_{Si} \quad (18)$$

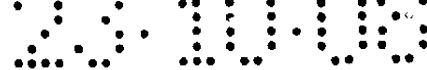
$$c_{UQrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Qriv} * c_{Si} \quad (19)$$

A analogicky k výpočtu hodnot Q_v je výsledná hodnota Y_v dána rovnicí

$$Y_v = \frac{U_{Y1v} * K_{Y1v} + U_{Y2v} * K_{Y2v} + U_{Y3v} * K_{Y3v}}{b_{UY1v} * K_{Y1v} + b_{UY2v} * K_{Y2v} + b_{UY3v} * K_{Y3v}} \quad (20)$$

přičemž

$$K_{Y1v} = a_{UY2v} * c_{UY3v} - a_{UY3v} * c_{UY2v}$$



$$K_{Y2v} = a_{UY3v} * c_{UY1v} - a_{UY1v} * c_{UY3v} \quad (21)$$

$$K_{Y3v} = a_{UY1v} * c_{UY2v} - a_{UY2v} * c_{UY1v}$$

a

$$a_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * a_{Siv} \quad (22)$$

$$b_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * b_{Si} \quad (23)$$

$$c_{UYrv} = \sum_{i=1}^4 V_{Yriv} * c_{Siv} \quad (24)$$

U měrného dvojkolí jsou výsledné hodnoty Q resp. Y počítány jako střední hodnoty ze 4 hodnot Q_v resp. Y_v .

$$Q = \frac{1}{4} \sum_{v=1}^4 Q_v \quad (25)$$

$$Y = \frac{1}{4} \sum_{v=1}^4 Y_v \quad (26)$$

Krok šestý

Kalibrace kol měrného dvojkolí, jejímž účelem je stanovení hodnot konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1...4$ – číslo dvojice můstků, $m = 1...8$ – číslo měřicího řezu), které náleží signálům S_i dvojic mostů pro jednotlivé měřicí řezy

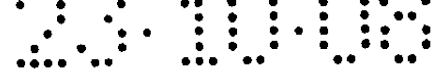
- jednotlivá kola měrného dvojkolí jsou při kalibraci zatěžována silami stejným způsobem a to :

- radiální silou FQ , která působí ve vzdálenosti $L1$,
- radiální silou FQ , která působí ve vzdálenosti $L2$ (přičemž $L1$ a $L2$ jsou vzdálenosti dotykového bodu od vztažné roviny),
- příčnou silou FY , která působí na poloměru R ,

přičemž zatěžování probíhá při kalibraci pouze v 8 polohách (pokud je nalepeno 8 tenzometrických můstků) $\alpha = 0^\circ$ až 315° s krokem 45°

a určování konstant a , b , c probíhá ve dvou krocích, které jsou založeny na rovnicích (3), (4), (5), přičemž konstanty a , b , c jsou zjišťovány pro každou polohu, dle následujících kroků:

Krok	Zatížení	Okrajová podmínka	Rovnice
------	----------	-------------------	---------



1	radiální silou FQ ve vzdálenosti $L1$ radiální silou FQ ve vzdálenosti $L2$	$FY = 0$	pro vyhodnocení konstant a a b jsou použity rovnice (3) und (4). $a = \left(\frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - \frac{\sigma_{L2}}{FQ_{L2}} \right) / (L_1 - L_2)$ $b = \frac{\sigma_{L1}}{FQ_{L1}} - a * L_1$
2	příčnou silou FY_1 a radiální silou FQ ve vzdálenosti $L1$ příčnou silou FY_2 a radiální silou FQ ve vzdálenosti $L1$	$FQ = \text{konst.}$ $FQ > 0$	$c = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{FY_1 - FY_2} \quad (27)$

přičemž postup podle kroku 2 bere v úvahu skutečnost, že na kalibračním stavu není možné realizovat zatížení silou FY za podmínky $FQ = 0$ a výsledkem kalibrace je soubor 96 konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1 \dots 4$, $k = 1 \dots 8$) dvojic mostů S_1 , S_2 , S_3 , S_4 (každý pár tvoří tenzometrické můstky uspořádané symetricky na disku kola, přičemž normála v dotykovém bodě je osou symetrie) pro úhly $\alpha = 0^\circ$ až 315° s krokem 45° (zvané poloha 1 až 8), přičemž

identifikace polohy dotykového bodu na obvodu kola je základní podmínkou pro funkci tohoto systému, přičemž rovnost mezi signály Q_v a hodnotou FQ , resp. mezi Y_v hodnotou FY platí, když působí sil FQ a FY se nacházejí v rovině měřicího řezu. Poloha je určována ze signálů Q_1 až Q_4 na základě následujících podmínek :

$\max(|Q_v|_{v=1 \dots 4}) - \min(|Q_v|_{v=1 \dots 4}) \leq \Delta Q_{\lim}$ rozdíl mezi maximem absolutních hodnot signálů Q_1 až Q_4 a minimem absolutních hodnot signálů Q_1 až Q_4 je ve stejném časovém okamžiku než stanovená mezní hodnota (v ideálním případě jsou hodnoty signálů Q_1 až Q_4 stejné,

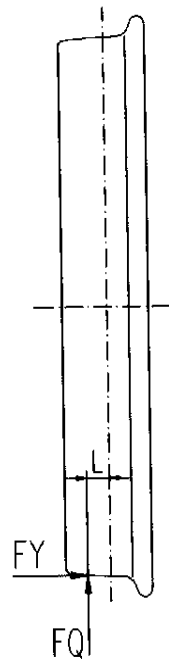
současně se jedná o lokální extrém průběhu signálů $|Q_v|_{v=1 \dots 4}$ v čase, – to nastává pouze tehdy, když se tenzometrický měřicí systém dostane do polohy, kdy dva Wheatstoneovy můstky, jejichž signály se sčítají, se nacházejí v symetrické poloze oproti působení sil FQ a FY ,



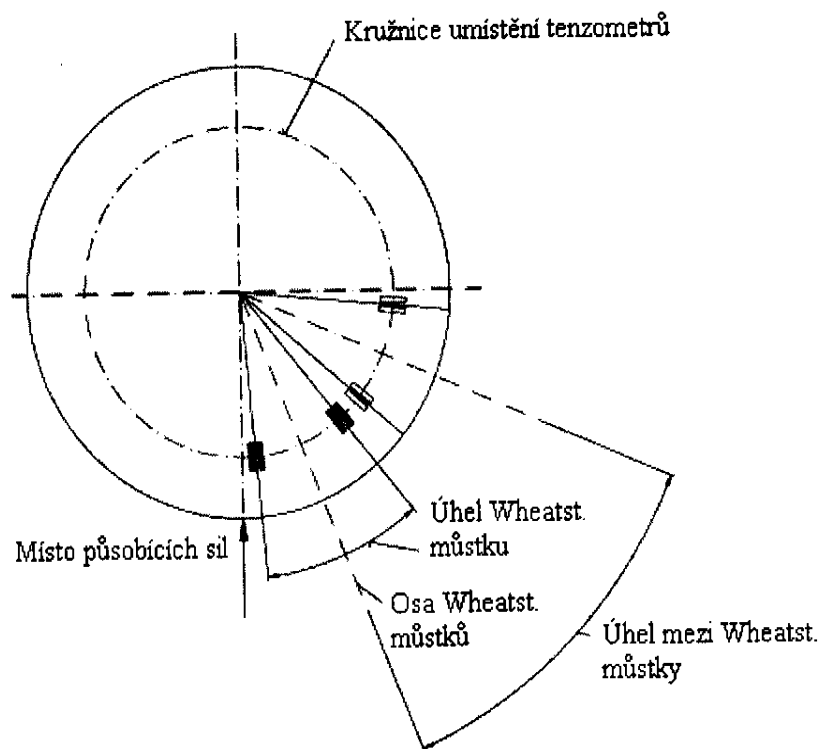
pro ověření výsledků kalibrace, probíhá kontinuálně probíhá výpočet hodnot S_{im} , přičemž $i = 1...4$, $m = 1...8$ a na základě hodnot S_{im} , hodnot kalibračních konstant a_{Sim} , b_{Sim} , c_{Sim} ($i = 1...4$, $m = 1...8$) a váhových koeficientů V_{Qvi} ($r = 1...3$ – pořadové číslo rovnice) jsou počítány hodnoty U_{Qrim} , ze kterých jsou počítány hodnoty Q_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Q) resp. hodnoty U_{Yrim} , ze kterých jsou počítány hodnoty Y_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Y),

přičemž

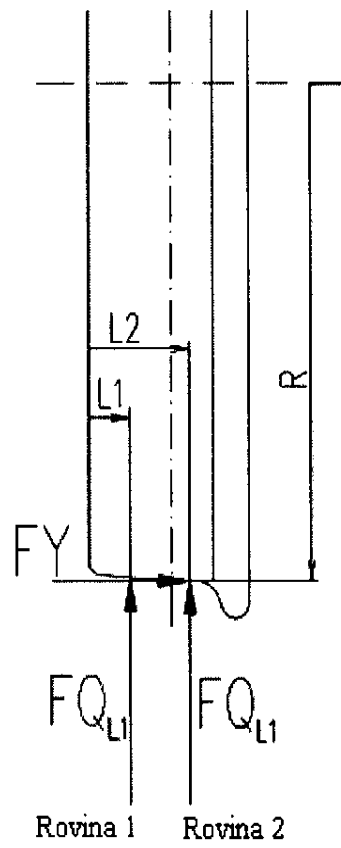
v těch polohách otáčení kola, kde je splněna podmínka souměrnosti Wheatstoneových můstků tj. dotykový bod se nachází v měřicím řezu m , jsou počítány výsledné hodnoty Q_m a Y_m . Hodnota Q_m je počítána jako střední hodnota z hodnot Q_{vm} ($v = 1...4$ – číslo nezávisle počítané hodnoty Q , m = číslo měřicího řezu) a hodnota Y_m jako střední hodnota z hodnot Y_{vm} ($v = 1...4$ – počet nezávisle počítaných hodnot Y , m = číslo měřicího řezu), přičemž průměrování slouží k tomu, aby se zmenšil vliv chyb měření.



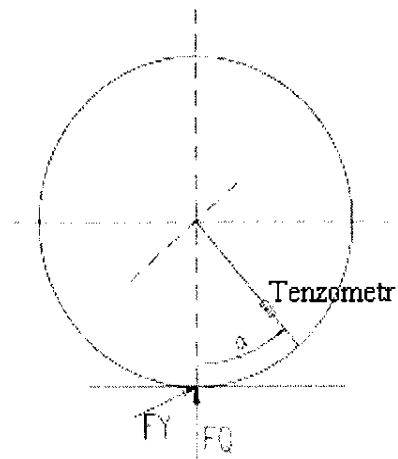
Obr. 1



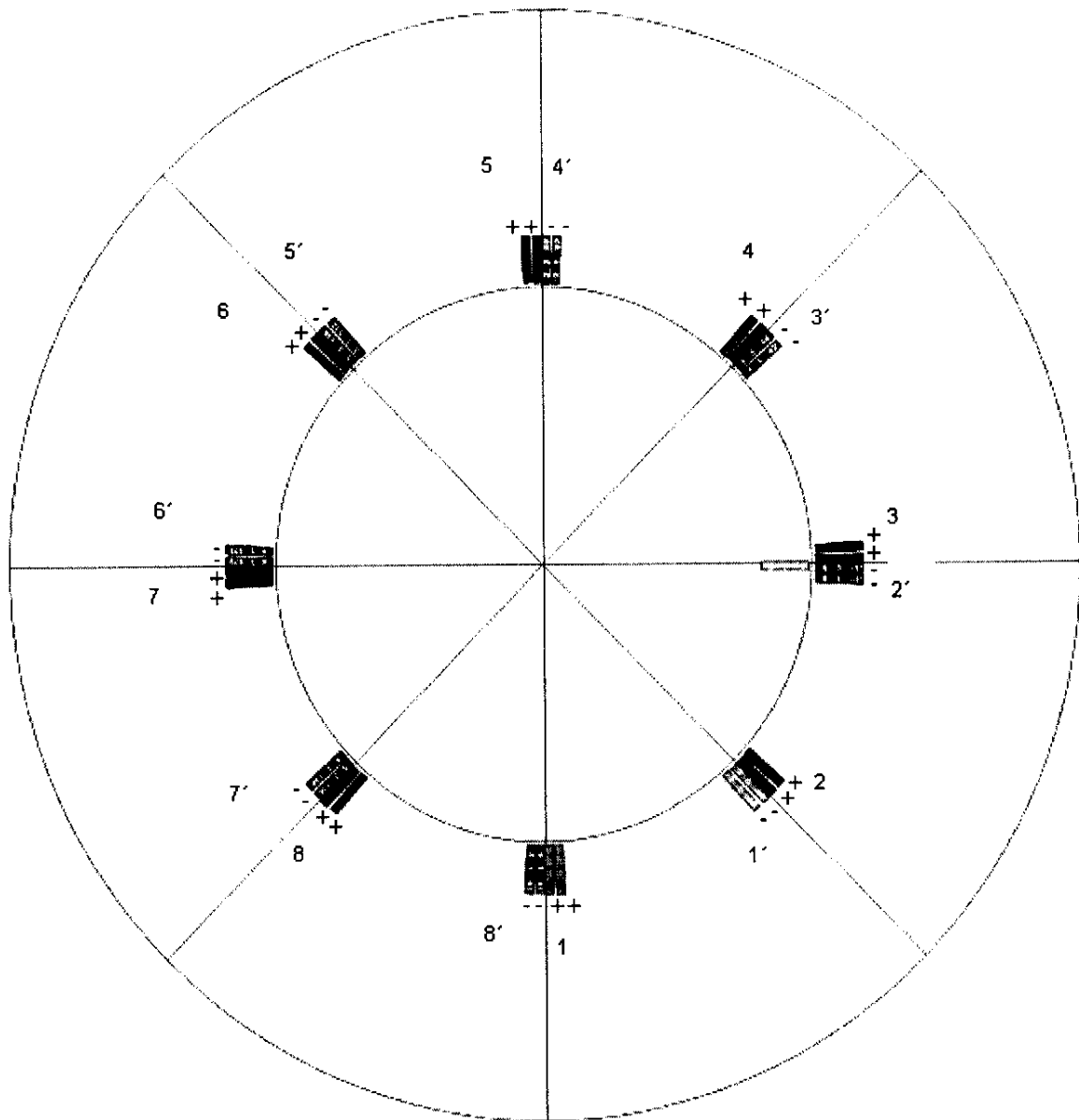
Obr. 2



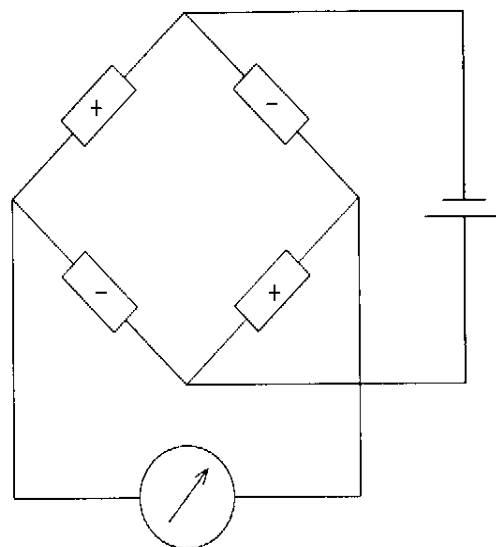
Obr. 3



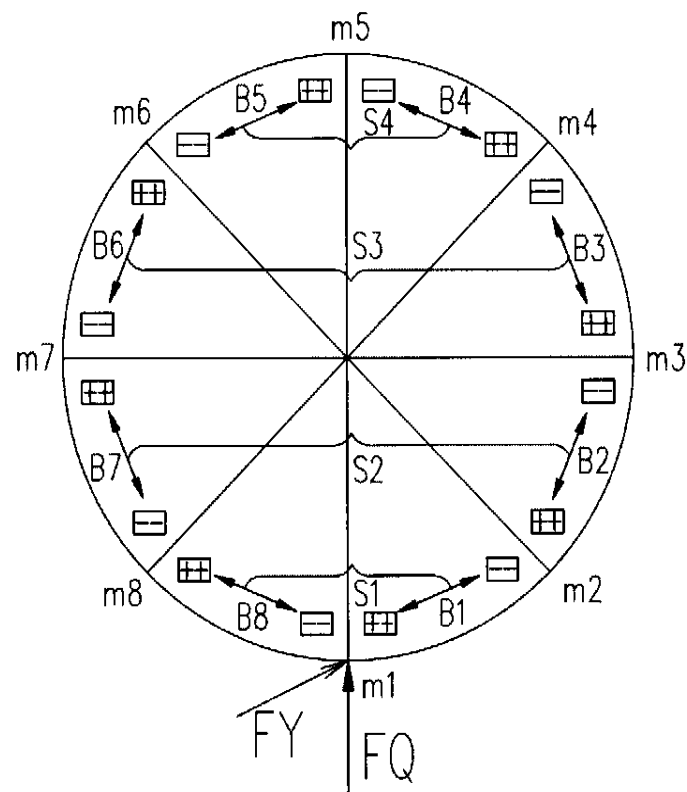
Obr. 4



Znaménka +/- vyjadřují umístění příslušného tenzometru v můstku v souladu se schématem obr. 6
Obr. 5

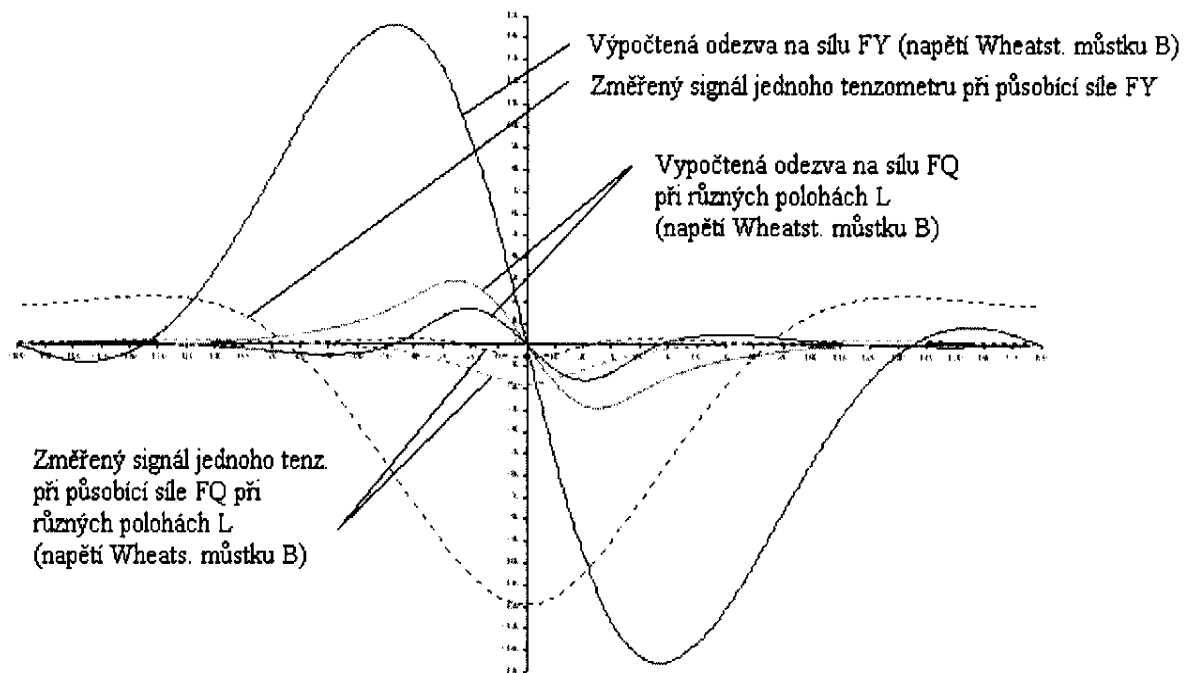


Přřazení znamének +/- tenzometrům v můstku (vysvětlivka k obr. 5)
Obr. 6



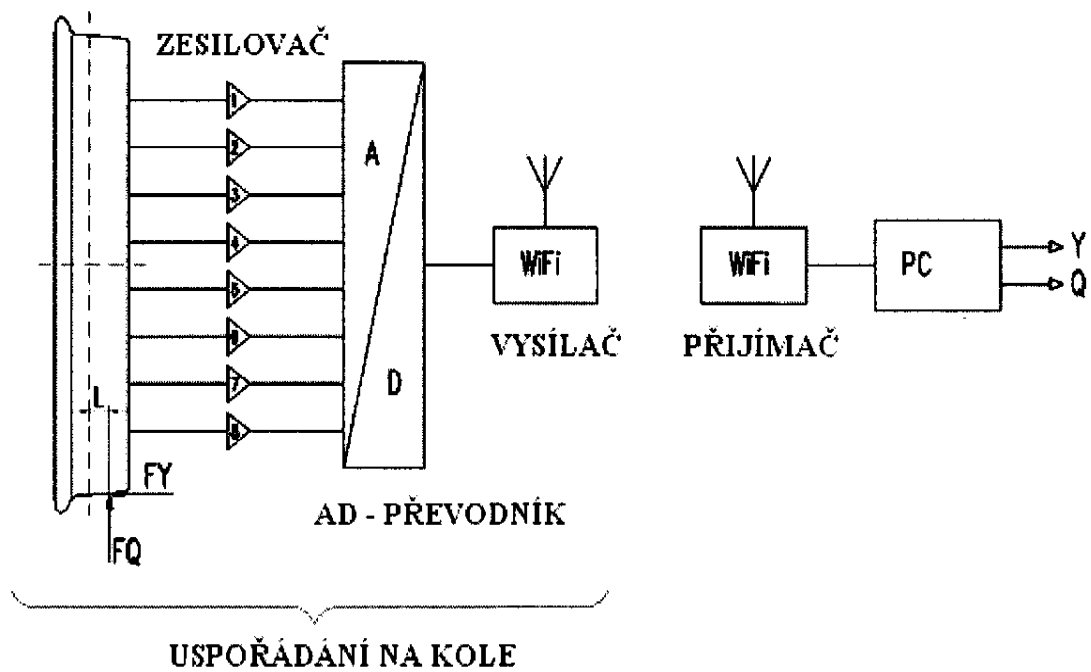
B_i = napětí mostu ($i = 1...8$)
 S_i = součet napětí mostů $B_i + B_{(8+1-i)}$ ($i = 1...4$)

Obr. 7

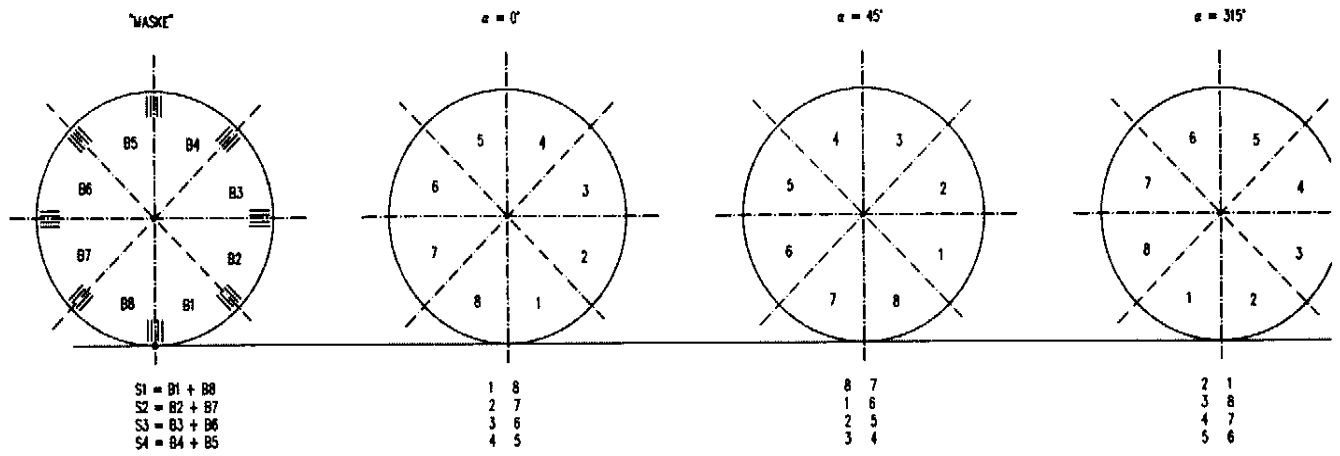


vodorovná osa – úhel alfa ($-180^\circ + +180^\circ$)

Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10