

PRIEBEH KINEMATICKÝCH PARAMETROV PRI BRZDENÍ AUTOMOBILU A PÔSOBENIE DYNAMICKÝCH VPLYVOV

COURSE OF KINEMATIC PARAMETERS DURING THE COURSE OF BRAKING AND ACTION OF DYNAMIC EFFECTS

Článok popisuje priebeh kinematických veličín pri odvalovaní kolies automobilu pri procese brzdenia so zameraním na experimentálne zisťovanie ich časových závislostí, vplyve brzdneho sklzu predných kolies na priebeh brzdenia spolu s pôsobením gradientu rastu brzdneho spomalenia na okamih blokovania kolies, z pohľadu bezpečného smerového ovládania automobilu.

The article deals with a course of kinematic values at rolling of car wheels during the course of braking focusing on experimental measurement of their time-base relations and effect of a braking slip of front wheels on a course of braking along with an effect of a gradient of braking deceleration build-up on a moment of wheel blocking from a view of safe car handling in direction.

1. Úvod

Rozvoj automobilovej dopravy prináša so sebou popri pozitívnych efektoch pre chod hospodárskeho života, ale aj života spoločnosti všeobecne, tiež aj negatívne javy vo forme rastu ekologického zaťaženia prostredia, materiálnych škôd pri dopravných nehodách a v nie poslednom rade aj následkami na životoch a zdraví účastníkov cestnej premávky pri nehodách. Preto riešenie vlastností automobilu ovplyvňujúcich ich bezpečný pohyb po ceste patrí k prvoradým smerom ich technického vývoja.

Z tohto pohľadu je základom bezpečného pohybu automobilu trvalé silové spojenie s povrchom vozovky, ktoré sa realizuje prostredníctvom kolies automobilu. Toto spojenie má prítom z kinematického hľadiska zvláštny charakter, lebo pneumatiky kolies zabezpečujúce silovú väzbu pohybujúceho sa vozidla s vonkajším prostredím sa pri odvalovaní po vozovke deformujú v radiálnom, axiálnom aj tangenciálnom smere.

2. Interakcia pneumatiky s vozovkou

Na bezpečné silové spojenie automobilu s vonkajším prostredím je rozhodujúca schopnosť kolies prenášať pri rôznych stavoch povrchu vozovky tangenciálnu silu F_t , pre ktorú platí všeobecne na každom kolese vzťah vyjadrený pomocou trecej kružnice, a to

$$F_{ti} = F_{txi}^2 + F_{tyi}^2, \quad (1)$$

kde F_{tx} je pozdĺžna hnacia alebo brzdná sila pôsobiaca na koleso a F_{ty} bočná sila vyvolaná jazdnými parametrami automobilu a pôsobiacimi vonkajšími (prípadne vnútornými) rušiacimi silami.

1. Introduction

Besides positive effects on economy and society life in general, development of automobile transport brings some negatives in a form of increasing impact on the environment, material damages in car crashes, and traffic fatalities and sustained health damages on people in traffic. Technical development of car characteristics should be directed at those that effect their safe movement on a road.

From that point the essentials of safe car movement is a permanent power contact with a road surface, which is ensured by car wheels. That contact has special character from a kinematic point of view since tires, securing a power relation between a moving car and the surroundings represented by a road, are deformed in radial, axial and tangential direction when rolling on a road.

2. Interaction between tire and the ground

Ability of wheels to transmit, at various road surface conditions, a tangential force is essential for safe power contact between a car and its surroundings. There is a relation for tangential force generally valid for each wheel and expressed by a Kamm circle of frictional forces as follows:

$$F_{ti} = F_{txi}^2 + F_{tyi}^2, \quad (1)$$

whereas F_{tx} is a longitudinal drive or braking force acting on a wheel and F_{ty} is a side force caused by driving parameters of a car and external (or internal) interfering forces.

* Doc. Ing. Pavol Hudec, CSc., Ing. Eduard Rojko, CSc.

KALSM, Sjf STU, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava

Tel.: ++421-7-57296304, ++421-7- 57296307, Fax: ++421-7-52962650, E-mail: hudec@sjf.stuba.sk, rojko@cvt.stuba.sk

Nevyhnutným predpokladom prenosu tangenciálnej sily kolesom vozidla je príľnavosť medzi pneumatikou a vozovkou, ktorá je podmienená existenciou dostatočne veľkej zvislej reakcie F_z pôsobiacej na príslušnom kolese. Z teórie príľnavosti kolesa, ktoré sa valí po vozovke a je vybavené pneumatikou je známe, že prenos sily sa uskutočňuje prostredníctvom troch elementárnych zložiek príľnavosti - adhéznej, hysteréznej a abrazívnej,

$$F_{ti} = \Sigma (\delta F_a + \delta F_h + \delta F_{ab}), \quad (2)$$

ktorých vplyv a podiel je determinovaný druhom povrchu vozovky a jej okamžitého stavu, konštrukciou pneumatiky, materiálom behúňa a konfiguráciou jeho dezénu.

Ak sa v ďalších úvahách obmedzíme na silové spojenie kolesa s vozovkou pri priamej jazde automobilu, bude najvyššia kolesom prenesiteľná pozdĺžna tangenciálna sila limitovaná vzťahom

$$F_{tci} = \mu_X \cdot F_{zi}, \quad (3)$$

kde je F_{zi} zvislé zaťaženie príslušného kolesa a μ_X hodnota súčiniteľa príľnavosti, ktorá je pritom premenlivá a závislá nielen od trecích vlastností dvojice pneumatika - vozovka, ale aj od spôsobu odvalovania kolesa po vozovke.

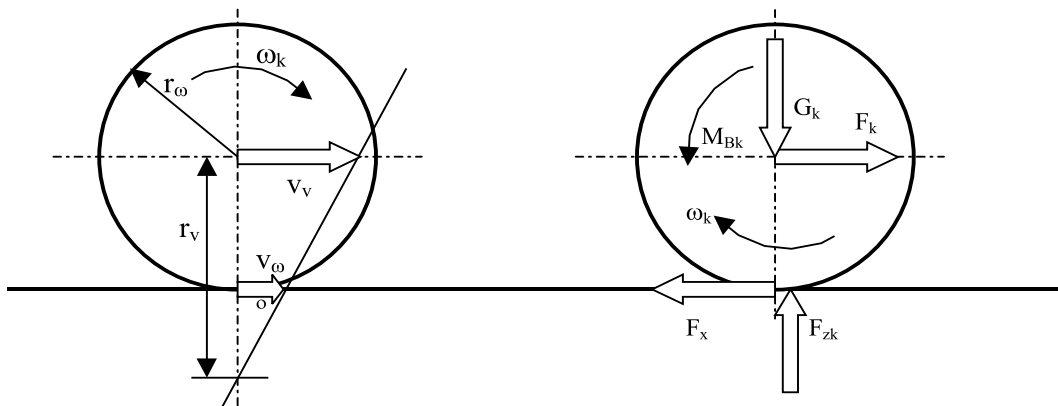
The pre-condition of a tangential force transmission by a car wheel is adhesion between a tire and the ground, conditioned by an existence of a sufficient vertical reaction F_z acting on a particular wheel. It is known from a theory of adhesion of a wheel rolling on the ground and equipped with a tire, that a transmission of force is made through three elementary adhesion components - adhesion, hysteresis and abrasion, which impact and portion is determined by a type of a road surface and its momentary condition, tire design, material of tread and its design configuration.

$$F_{ti} = \Sigma (\delta F_a + \delta F_h + \delta F_{ab}), \quad (2)$$

When concentrating on our next thoughts only on a power contact between a wheel and a ground at rectilinear drive of a car, the following relation limits the highest transmittable-by-wheel tangential force:

$$F_{tci} = \mu_X \cdot F_{zi}, \quad (3)$$

whereas F_{zi} is a vertical load of a particular wheel and μ_X is a value of a coefficient of adhesion, which is changeable and dependent not only on frictional properties of the couple tire-ground but also on a way a wheel is rolling on the ground.



- G_k - zaťaženie kolesa,
- M_{Bk} - brzdný moment na kolese,
- F_x - brzdná sila na kolese,
- r_ω - účinný polomer voľne sa valiaceho kolesa,
- r_v - fiktívny valivý polomer kolesa vypočítaný z uhlovej rýchlosti rotácie kolesa so sklzom,
- ω_k - uhlová rýchlosť rotácie kolesa,
- v_v - rýchlosť pohybu vozidla,
- v_ω - rýchlosť kolesa v dotykovej stope

- G_k - wheel load,
- M_{Bk} - braking torque on a wheel,
- F_x - braking force on a wheel,
- r_ω - effective radius of a freely rolling wheel,
- r_v - fictitious tire rolling radius,
- ω_k - wheel angular velocity,
- v_v - speed of vehicle,
- v_ω - wheel velocity in a contact trail

Obr. 1. Kinematické pomery na brzdenom kolese

Fig. 1. Kinematic relations on a braked wheel

Pre pohyb automobilu po pevných komunikáciách je charakteristický nepoddajný povrch vozovky, preto v styku kolies s vozovkou dochádza k deformácii účinkom pôsobiacich síl len na kolesách. Z troch všeobecných stavov valiaceho sa kolesa - tzv. čistého valenia, valenia s preklzom (pri pôsobení hnacieho momentu) a valenia so sklzom (ak pôsobí brzdný moment), sa zameriame na

A rigid road surface is typical for movement of a car on a solid ground; therefore, at wheels-ground contact, deformation is caused by forces acting only on wheels. Having three general states of a rolling wheel: so-called pure rolling, rolling with a wheel spin (when drive torque is acting) and rolling with a wheel slip (when braking torque is acting) we will focus on the latter; the most

posledný stav, ktorý je z hľadiska bezpečnosti jazdy najdôležitejší. Silové a kinematické pomery pri valení brzdeného kolesa charakterizuje obr. 1.

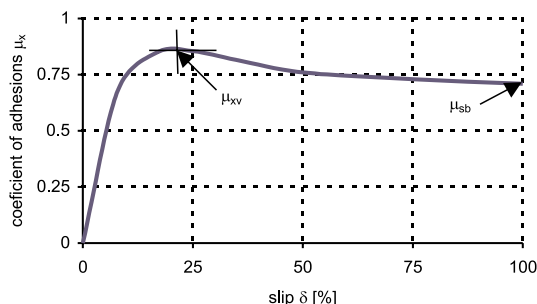
Na časový priebeh brzdzenia automobilu majú významný vplyv vlastnosti pneumatík pri zaťažení brzdým momentom M_B , vyvolávajúcim brzdné spomalenie. Prítom platí

$$\mu_x = \frac{\sum F_{xi}}{G} = \frac{a_x}{g}, \quad (4)$$

kde je G - tiaž automobilu, $\sum F_{xi}$ - súčet brzdných síl, a_x - brzdné spomalenie, g - tiažové zrýchlenie. Z uvedeného vzťahu vyplýva podľa okamžitého stavu vozovky maximálne dosiahnuteľné brzdné spomalenie. Podmienku dosiahnutia maxima súčiniteľa príľnavosti je dosiahnutie optimálneho brzdného sklzu, ktorý v stope kolesa vzniká následkom pôsobenia brzdných síl. Pre brzdný sklz platí vzťah

$$\delta = \frac{v_\omega - v_v}{v_\omega} \cdot 100 = \left(1 - \frac{v_v}{v_\omega}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{r\omega}{r_v}\right) \cdot 100 \quad (\%), \quad (5)$$

Na obr. 2 je všeobecný stacionárny priebeh súčiniteľa príľnavosti na suchej asfaltovej vozovke v závislosti od brzdného sklzu. Z neho vidieť, že maximálny súčiniteľ príľnavosti μ_{xv} , a teda aj najväčšia prenositeľná brzdná sila sa dosahuje pri určitom, relatívne nízkom brzdnom sklze a v krátkom rozsahu, v ktorom je koleso schopné udržať iba systém ABS, pokiaľ bude senzorom vybavené každé koleso vozidla.



Obr. 2. Sklzová charakteristika pozdĺžneho súčiniteľa príľnavosti μ_x
Fig. 2. Slip characteristics of a longitudinal coefficient of adhesion

Reálne deje pri brzdení majú nestacionárny priebeh a sú ovplyvnené ďalšími faktormi, ktoré priebeh pohybových veličín ovplyvňujú. Na overenie týchto vplyvov je potrebné ich experimentálne skúmať priamo na kolesách vozidla.

Jednu z možností experimentálneho skúmania brzdného procesu a jeho kinematických vlastností v tomto smere predstavuje meracia sústava znázornená na obr. 3, ktorá je zložená na báze meracích zariadení CORREVIT a DATRON s digitálnym záznamom a spracovaním meraných veličín.

Pôsobenie vysokých pozdĺžnych síl pri brzdení podstatne znižuje možnosť prenosu zaťaženia v bočnom smere, je preto mimoriadne vážnou otázkou smerovej stability brzdzenia a bezpečnej jazdy automobilom, zvlášť ak sa pohybuje vysokou rýchlosťou. Ak má byť z pohľadu bezpečného brzdzenia splnená základná podmienka - zabezpečenie aspoň minimálnej schopnosti prenosu bočnej sily kolesom a tým dosiahnutie smerového ovládania aj v priebehu brzdného procesu, musí byť tento riadený tak, aby nedochádzalo k blokovaniu kolies vozidla, t. j. 100 %-nému brzdnému sklzu. Pri automobiloch vybavených protiblokovacím systémom ABS je táto podmienka splnená, bez ohľadu na to akým, hoci aj extrémnym spôsobom brzdí vodič vzhľadom na okamžité podmienky na vozovke.

important from a safety point of view. Fig. 1 shows force and kinematic relations at rolling of a braked wheel.

Time-base course of car braking is significantly influenced by properties of tires when loaded by braking torque M_B , causing braking deceleration. Generally the following is valid:

$$\mu_x = \frac{\sum F_{xi}}{G} = \frac{a_x}{g}, \quad (4)$$

whereas G is gravity of a car, $\sum F_{xi}$ is a summation of braking forces, a_x is braking deceleration, g is acceleration due to gravity. A maximum achievable braking deceleration, dependent on the momentary state of a ground, is apparent from the above relation. Achievement of a maximum coefficient of adhesion is conditioned by achievement of an optimal braking slip, which occurs in a wheel trace as a result of application of braking force. Braking slip is expressed by the following:

Fig. 2 shows a general stationary course of a coefficient of adhesion on a dry asphalt road depending upon a braking slip. It is obvious from the figure that

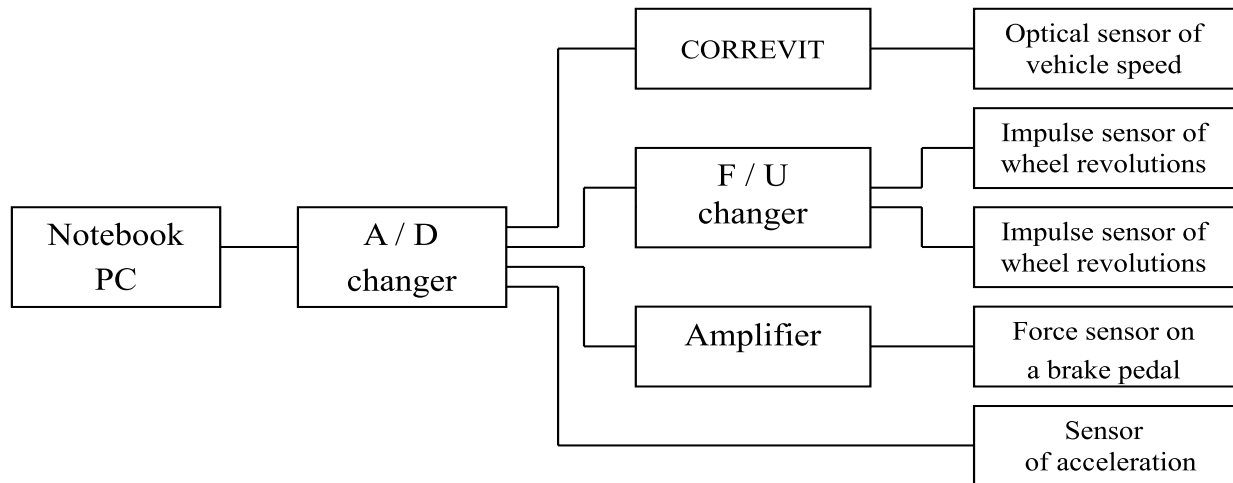
a maximum coefficient of adhesion μ_{xv} , which means the highest transmittable braking force, is achieved at a particular, relatively low-braking slip, and in a short range, when a wheel could be held by ABS, in the case each wheel of a car is equipped with sensors.

Real braking has, however, a non-stationary course and is influenced by other factors, which have an effect on the course of

motion values. An experimental examination directly on car wheels is necessary to check.

One of the options of an experimental examination of the braking process and its kinematic characteristics is a measuring system based on measuring devices CORREVIT and DATRON with a digital recording and processing of the measured values. The system is shown in the Fig. 3.

Action of high longitudinal forces when braking substantially decreases a possibility of a load transfer in a side direction; therefore, it is a significant matter in respect of directional braking stability and safe car driving, particularly moving at high speed. If, from a safe braking point of view, a fundamental condition is to be met, i.e. making at least minimal ability of side-force transfer by a wheel sure and by achievement of directional control even when braking, the braking process has to be controlled in a way so that car wheels blocking i.e. 100 % braking slip does not happen. This condition is met in the cars equipped with ABS anti-block system, irrespective of the way, even an extreme one, a driver is braking considering momentary conditions on a road.



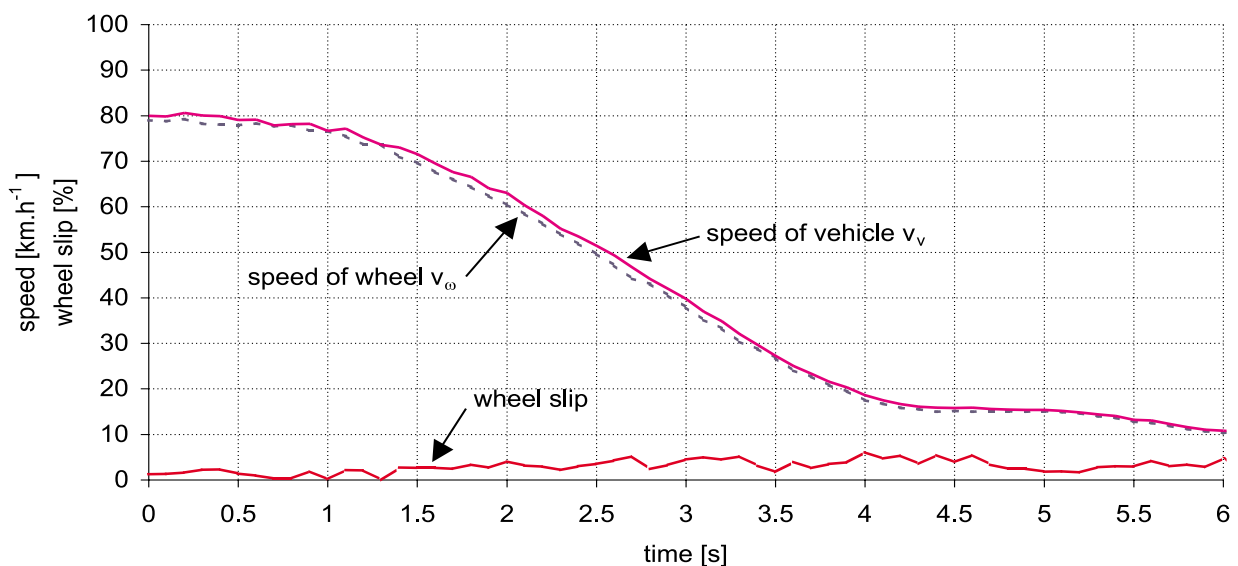
Obr. 3. Bloková schéma meracieho zariadenia
Fig. 3. Block scheme of the measuring device

Zložitejšia situácia nastáva pri automobiloch bez takejto sústavy, kedy je jediným regulátorom intenzity brzdzenia vodič vozidla. Nasledujúce experimentálne merania, práve takéhoto prípadu, boli vykonané na automobile nižšej strednej triedy s meracou hmotnosťou 1150 kg a vybaveným konvenčnou brzdovou sústavou.

Na obr. 4 je časový záznam pohybových veličín na prednom kolese automobilu pri intenzívnom, ale nie kritickom brzdení z rýchlosti $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ brzdným spomalením približne $a_x = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Z nameranej rýchlosti vozidla v_v a obvodovej rýchlosti kola v_ω je vypočítaný priebeh sklzu kola δ . Brzdná sila vyvoláva v tomto prípade iba malý sklz na kolese a rezerva schopnosti prenosu bočnej sily zaručuje bezpečný pohyb.

More complicated situations arise using cars without the anti-block system, when a driver is the only regulator of braking intensity. Following experimental measurements focused on such a case were carried out on a car of lower middle class with a weight 1150 kilogram and equipped with a standard braking system.

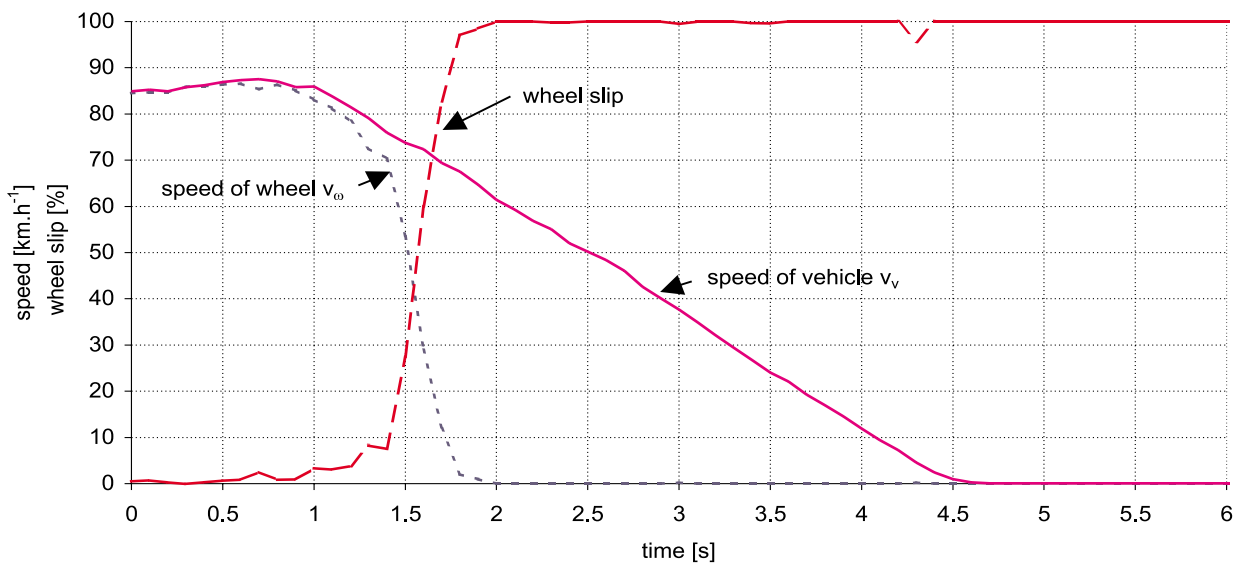
Fig. 4 shows a time-base record of motion values on a front wheel of a car at intensive but not critical braking from a speed of 80 kmph by braking deceleration a_x circa $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. From the recorded speed of a car v_v and peripheral wheel speed v_ω a course of a wheel slip δ is calculated. Braking force causes only a small wheel slip in this case, and a reserve of side-force transfer ability ensures safe motion.



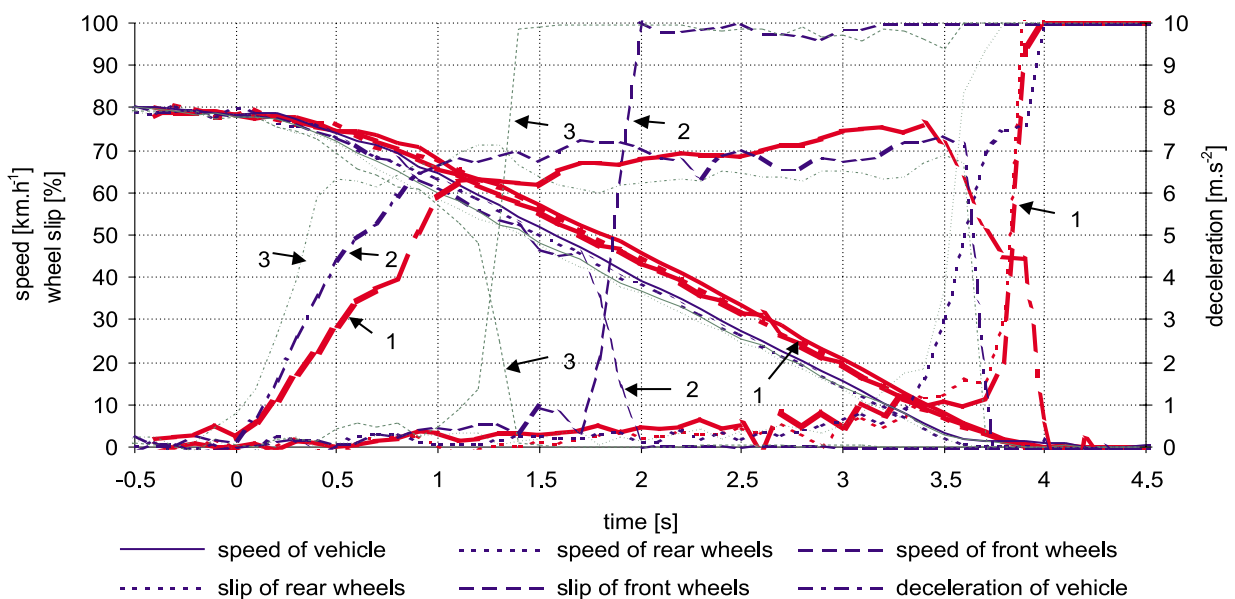
Obr. 4. Nameraný priebeh kinematických veličín na brzdenom prednom kolese spomalením $a_x = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Fig. 4. Recorded course of kinematic values on a front braked wheel by a deceleration $a_x = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Pri extrémnom brzdení so stredným brzdným spomalením $a_x = 7 \text{ m.s}^{-2}$ a ovládaní intenzity brzdenia vozidla iba vodičom dôjde k stavu, ktorý je zaznamenaný na obr. 5. Z časového záznamu vidieť lineárny pokles rýchlosti vozidla až do úplného zastavenia. Pritom, zobrazený priebeh brzdného sklzu kolesa ukazuje, že k úplnému zablokovaniu predných riadených kolies automobilu, t. j. k ich 100 %-nému sklzu, došlo už za 0,5 s od začiatku nábehu brzdného spomalenia. Automobil sa dostáva do smerovo nestabilného stavu bez možnosti korekcie riadením ešte pri relatívne vysokej rýchlosti automobilu na hranici 70 km.h^{-1} .

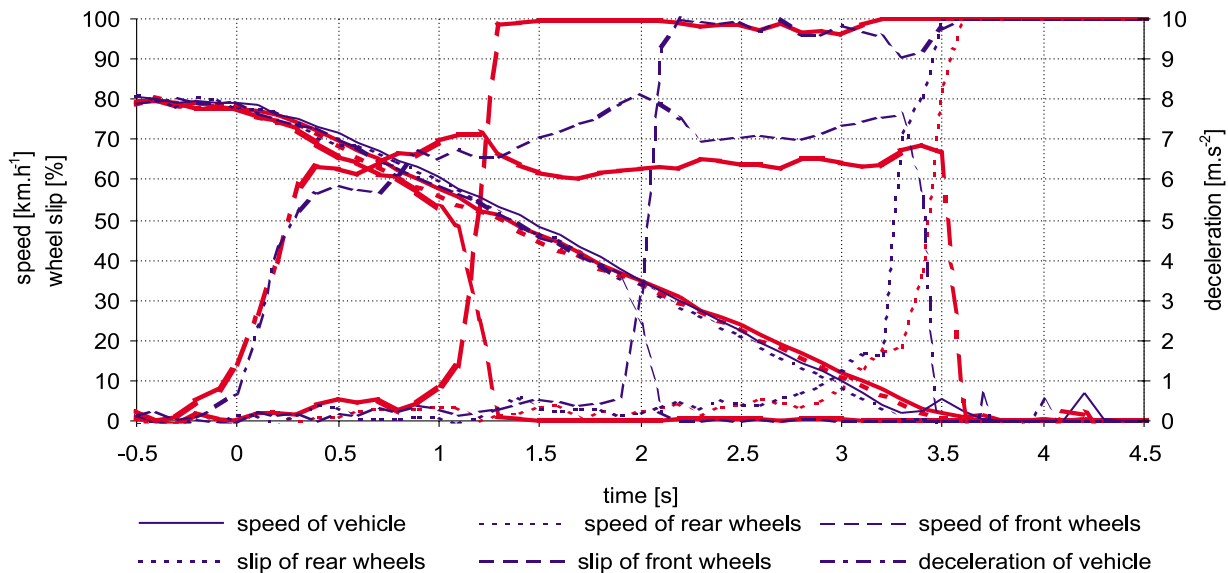
A situation recorded at extreme braking at mean braking deceleration $a_x = 7 \text{ m.s}^{-2}$ and control of intensity of car braking performed only by a driver is shown on Fig. 5. From a time-base record a linear decrease of car speed up to a total stop of a car is seen. Whereas, the course of a braking slip of a wheel indicates that a total blocking of front driven wheels of a car, i.e. 100 % slip already happened in 0.5 s from a braking deceleration build-up start. A car enters a non-stable state in direction without possibility of a correction through steering even at relatively high speed of a car, 70 kmph.



Obr. 5. Nameraný priebeh kinematických parametrov na prednom kolese automobilu pri brzdení spomalením $a_x = 7 \text{ m.s}^{-2}$
Fig. 5. Recorded course of kinematic parameters on a front car wheel at braking deceleration $a_x = 7 \text{ m.s}^{-2}$



Obr. 6. Priebeh brzdenia na kolesách automobilu pri rôznych hodnotách nábehu brzdného spomalenia
Fig. 6. Course of braking on front car wheels at different values of braking deceleration build-up



Obr. 7. Posunutie hranice blokovania predných kolies zmenšením gradientu brzdného spomalenia pri jeho vyšších hodnotách
Fig. 7. Shifting of a blocking point of front wheels by means of decreasing a gradient of braking deceleration at increased values of deceleration

Ako ukazujú experimentálne merania, okamih počiatku blokovania kolesa je závislý od gradientu nábehu brzdného spomalenie a_x , ktorý charakterizuje nárast tangenciálnej brzdnjej sily na kolese automobilu. Tento vplyv znázorňuje obr. 6, kde je nábeh brzdného spomalenia na približne rovnakú strednú hodnotu realizovaný tromi rozdielnymi gradientmi zrýchlenia. V prvom prípade, s gradientom nábehu brzdného spomalenia $0,60 \text{ g/s}$, dôjde na prednom kolese k 100 %-nému brzdnému sklzu až za $3,61 \text{ s}$, pri už takmer nulovej rýchlosti automobilu. V druhom prípade, pri gradiente nábehu brzdného spomalenia $0,88 \text{ g/s}$, 100 %-ný sklz nastane už za $1,9 \text{ s}$, pri rýchlosti automobilu okolo 40 km.h^{-1} . Ako vidieť z tretieho priebehu brzdenia, pri gradiente nábehu brzdného spomalenia $1,67 \text{ g/s}$ dôjde k 100 %-nému brzdnému sklzu kolies už za $1,1 \text{ s}$ od počiatku nábehu brzdného spomalenia už pri rýchlosti vyššej ako 50 km.h^{-1} . Prítom extrémny nábeh brzdného spomalenia nemá na dobu zastavenia vozidla takmer žiadny vplyv.

Priaznivejším je z pohľadu zlepšenia ovládateľnosti vozidla v priebehu brzdenia nárast brzdného spomalenia podľa obr. 7, kde po prakticky zhodnom počiatočnom nábehu dochádza k jeho pozvoľnému nárastu pri vysokých hodnotách spomalenia. Aj napriek vyšším špičkovým hodnotám brzdného spomalenia dôjde k 100 %-nému sklzu kolies neskôr, pri rýchlosti jazdy na hranici 30 km.h^{-1} . Ovládanie bŕzd subjektom vodiča je v takomto prípade veľmi náročné a vyžaduje zdokonaľovanie schopností špecializovaným výcvikom.

As demonstrated by experimental measurement, the starting moment of wheel blocking is dependent on the gradient of braking deceleration (a_x) build-up, as a result of a tangential braking force growth on a car wheel. That effect is shown in Fig. 6, where a build-up of braking deceleration to approximately the same mean value is made by three different gradients of deceleration. In the first case, with a gradient of braking deceleration build-up equal to 0.60 g.s^{-1} , 100 % braking slip on a front wheel occurs in 3.61 s at almost zero speed of the car. In the second case, when gradient of braking deceleration build-up is 0.88 g.s^{-1} , 100 % slip occurs in 1.9 s at a car speed of 40 kmph . It is apparent from the third course of braking, at a gradient of braking deceleration build-up of 1.67 g.s^{-1} , 100 % braking wheel slip occurs even in 1.1 s from a braking deceleration build-up start at a speed higher than 50 kmph . An extreme braking deceleration build-up does not have any particular effect on a time of a car stopping.

More preferable from improved car steering ability during a course of braking point of view is a braking deceleration build-up shown in Fig. 7, where after a starting build-up of the same value there is a gradual increase in its value at high values of deceleration. Despite higher peak values of braking deceleration, 100 % wheel slip will occur later, at a speed of 30 kmph . Handling of a braking process by a driver is very difficult in such a case and requires improved capabilities by taking a special training.

Literatúra - References

- [1] ZOMOTOR, A.: *Fahrverhalten*, VOGEL Buchverlag Würzburg, 1987
- [2] ROMPE, Heising: *Objective Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen*, TÜV-Verlag, 1984
- [3] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidiel*, Nakladatelství Vlk, 2000