

Analýza využitelného součinitele adheze v příčném směru při kruhových zkouškách vozidla vybaveného ESP

Analysis of Usable Coefficient of Adhesion in the Lateral Direction at Driving in the Circle in Case of Vehicle Equipped with ESP

ABSTRAKT: Článek se zabývá zjišťováním hodnot využitelného součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru při současném zkoumání vlivu elektronického stabilizačního systému ESP na jízdní dynamiku vozidla Škoda Octavia II při kruhových zkouškách. Analyzovaná experimentální měření jsou závěrem tabelárně shrnuta s uvedením zjištěných hodnot využitelného součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru, které mohou být využity při analytickém stanovení mezní rychlosti vozidla v oblouku.

KLÍČOVÁ SLOVA: vozidlo, kruhové zkoušky, adheze v příčném směru, mezní rychlost, ESP

ABSTRACT: The article deals with estimation usable adhesion values between tire and road surface in the lateral direction, while examining the influence of ESP system on the driving vehicle dynamics Škoda Octavia II at circle tests. Analyzed experimental measurements has been summarized in tabular conclusion with values of usable adhesion between tire and road surface in the lateral direction has been found. Those values can be used in the analytical determination of limit vehicle speed in the curve.

KEYWORDS: vehicle, driving in a circle, adhesion in the lateral direction, speed limit, ESP

1. ÚVOD

Při řešení problematiky pohybu vozidla v obecném prostorovém oblouku patří mezi rozhodující podstatné veličiny ovlivňující mezní rychlost vozidla při průjezdu obloukem v první řadě geometrické parametry vozovky a dále využívaný součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru. V rámci experimentálních měření provedených v souvislosti s naplněním cílů dizertační práce hlavního autora článku byla podrobně analyzována série osmi kruhových zkoušek uskutečněných s vozidlem Škoda Octavia II 1.6 TDI CR při průjezdech definovaným obloukem o poloměru 51 m při rychlosti jízdy cca 70 km/h s aktivovaným a následně uživatelsky běžným způsobem deaktivovaným systémem jízdní stability ESP. Předmětem experimentálních měření bylo zjistit parametry jízdní dynamiky zkoušeného vozidla při kruhové zkoušce se zaměřením na využívaný součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru při současném zkoumání vlivu elektronického stabilizačního systému na jízdní dynamiku vozidla. Tato problematika není pro znaleckou oblast zcela osvětlenou kapitolou. Zjištěné hodnoty součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru mohou být okamžitě aplikovány při znalecké činnosti v případě posuzování mezní rychlosti vozidla v oblouku.

2. MĚŘENÝ OBJEKT

Objektem měření bylo vozidlo Škoda Octavia II 1.6 TDI CR, rok výroby 2010 (viz obr. 1), osazené pneumatikami Continental ContiEcoContact 195/65 R 15 91 H s výškou dezénu 6,0 mm na všech kolech s huštěním na předepsaný tlak. Vozidlo bylo vybaveno pohonem kol přední nápravy, elektronickým stabilizačním systémem ESP, samozřejmě vč. podřízených systémů ABS a ASR. Zkoušené vozidlo po celý průběh experimentálních jízdních zkoušek řídil zkušený testovací řidič automobilky Škoda Auto a.s., čímž byla zaručena vysoká spolehlivost a přesnost opakovaných průjezdů obloukem.



Obr. 1 Objekt měření – vozidlo Škoda Octavia II.
Figure 1 Object of the measurement – vehicle Škoda Octavia II.

Dodáno autory do redakce 9. 3. 2015. • Recenzní řízení od 10. 3. do 15. 10. 2015.

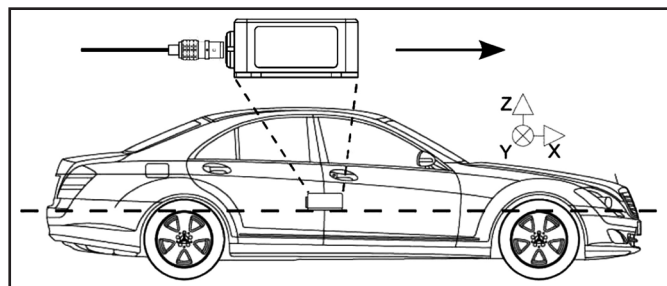
Ing. Vladimír Panáček, Ph.D., Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, Purkyňova 464/118, budova 01, 612 00 Brno, e-mail: vladimir.panacek@usi.vutbr.cz
doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D., Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, Purkyňova 464/118, budova 01, 612 00 Brno, e-mail: ales.vemola@usi.vutbr.cz

3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Pro zjišťování parametrů jízdní dynamiky vozidla Škoda Octavia II při provedených kruhových zkouškách bylo využito zařízení Racelogic, typ MFD RLVBDSP03 od anglického výrobce Racelogic UK [5]. Zobrazovací a ovládací jednotka zařízení (multifunkční display MFD) byla umístěna přísavkou na čelním skle vozidla (viz obr. 2). Externí měřicí jednotka IMU byla pevně umístěna na středovém tunelu podlahy za předními sedadly vozidla v předepsané montážní poloze v souladu s obr. 3 v podélné ose vozidla. Měřeními a ukládáními parametry jízdní dynamiky vozidla byl čas od začátku jízdní zkoušky, okamžik zásahu systému ESP, stav kontrolky ABS, stav kontrolky ASR, obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla, tlak v hydraulické jednotce brzd, rychlost vozidla, úhel natočení volantu, stáčivá rychlost vozidla, podélné a příčné zrychlení. Parametry jízdní dynamiky byly měřeny jednak externí měřicí jednotkou Racelogic IMU (viz obr. 3), dále byly v jednotném čase zaznamenávány údaje ze snímačů standardně instalovaných ve vozidle prostřednictvím řídicí jednotky vozidla.



Obr. 2 Zobrazovací a ovládací jednotka zařízení Racelogic.
Figure 2 Display and control unit equipment Racelogic.



Obr. 3 Poloha měřicí jednotky zařízení Racelogic v ilustrativním vozidle [5].
Figure 3 Position of the measuring device unit Racelogic in the illustrative vehicle [5].

4. MĚŘICÍ PLOCHA – POLYGON

Experimentální měření byla provedena na zkušebním polygonu společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici u Husí Lhoty, okr. Mladá Boleslav. Povrch polygonu je tvořen kvalitní asfaltovou vrstvou. Na měřicí ploše polygonu byl kužely vyznačen oblouk o poloměru 50 m (viz obr. 4). Zkoušené vozidlo Škoda Octavia II se při provedených experimentálních měřeních parametrů jízdní dynamiky pohybovalo vnitřními koly v těsné blízkosti kuželů podle

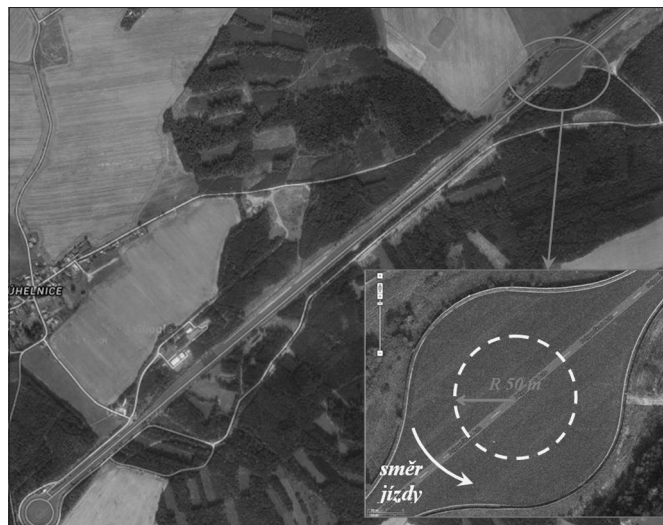
obrázku 5, ze kterého je tedy zřejmé, že skutečný poloměr rovinného oblouku, po kterém se zkoušené vozidlo pohybovalo, byl 51 m. Směr jízdy obloukem při jednotlivých kruhových zkouškách je vyznačen na obr. 4 v pravém dolním rohu.

Na obr. 6 je uveden jeden z dynamických průjezdů vozidla Škoda obloukem při pilotním měření, ze kterého je zřejmý úhel klopení karoserie vozidla cca 2°. Měřicí jednotka Racelogic IMU je umístěna uvnitř karoserie vozidla, která se v průběhu kruhové zkoušky naklápí vlivem působící odstředivé síly. Úhel naklonění karoserie je závislý na velikosti odstředivé síly, výšce těžiště vozidla a konstrukci systému odpružení vozidla. Proto tedy externí jednotkou IMU měříme tzv. boční zrychlení vozidla, které je na rozdíl od zrychlení příčného ovlivněno úhlem naklonění karoserie vozidla. Přesná hodnota příčného zrychlení vozidla by měla zahrnovat úhel naklonění karoserie při kruhové zkoušce. Pro výpočet příčného zrychlení ze známého (změřeného) bočního zrychlení platí vztah:

$$a_{pr} = a_{boč} \cdot \cos \chi,$$

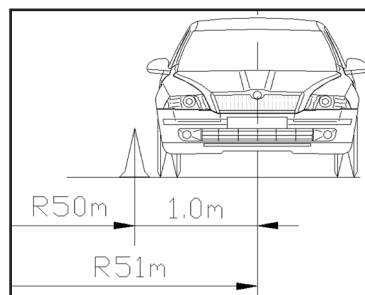
kde: χ je úhel naklonění karoserie.

Vzhledem ke známému průběhu goniometrické funkce kosinus lze konstatovat, že pro malé úhly naklonění karoserie cca do 8°, kdy hodnota kosinu nabývá hodnoty 0,99, můžeme považovat hodnotu bočního zrychlení vozidla za rovnou hodnotě příčného zrychlení.



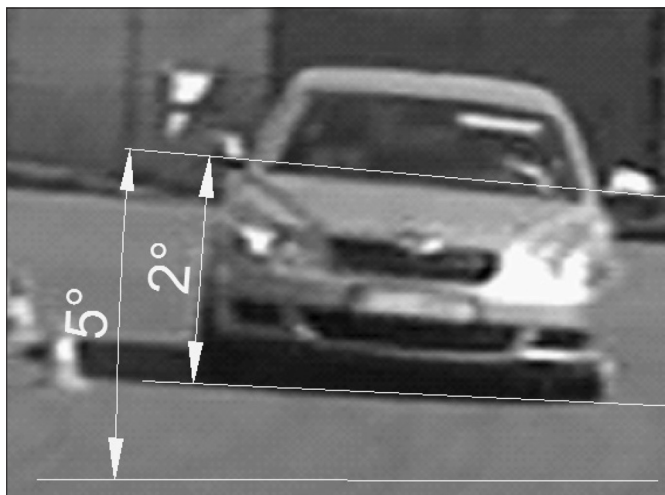
Obr. 4 Polygon vč. detailu části, kde byly provedeny průjezdy obloukem (čárkovaně vyznačena poloha kuželů) [6].

Figure 4 Polygon incl. detail of the part where driving in circle were made (dashed line indicates the position of the cones) [6].



Obr. 5 Poloha vozidla při experimentálních jízdách obloukem.

Figure 5 Position of the vehicle during experimental driving in circle.



Obr. 6 Naklopení karoserie vozidla v průběhu pilotního testu před zahájením experimentálních měření při rychlosti 70 km/h.

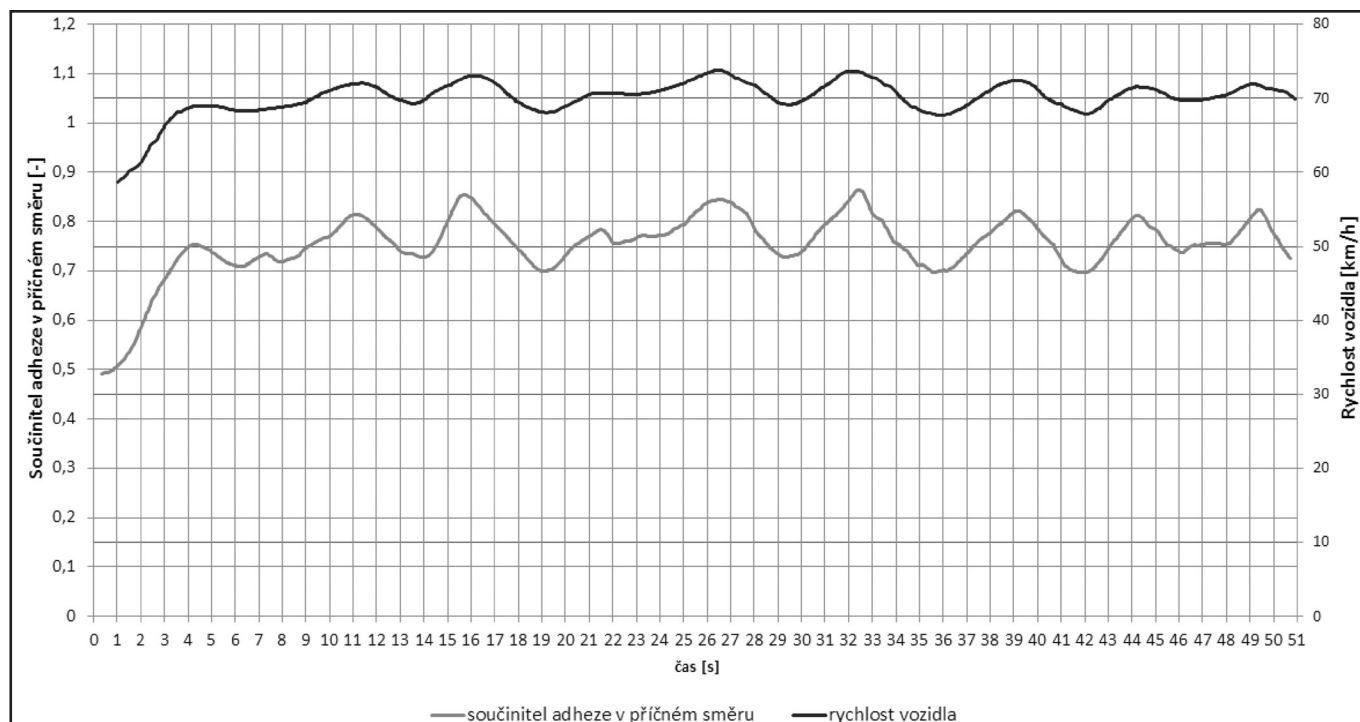
Figure 6 Tilting of the vehicle body during the pilot test before starting the experimental measurements at speed 70 km/h.

5. ANALYZOVANÁ EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V rámci uskutečněných experimentů bylo provedeno celkem osm kruhových zkoušek se zkoušeným vozidlem Škoda Octavia II definovaným obloukem o poloměru 51 m s aktivovaným a uživatelským způsobem deaktivovaným stabilizačním systémem ESP. Naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla jsou v následujících podkapitolách článku graficky zobrazeny, okomentovány, analyzovány a v závěru shrnuty a vyhodnoceny.

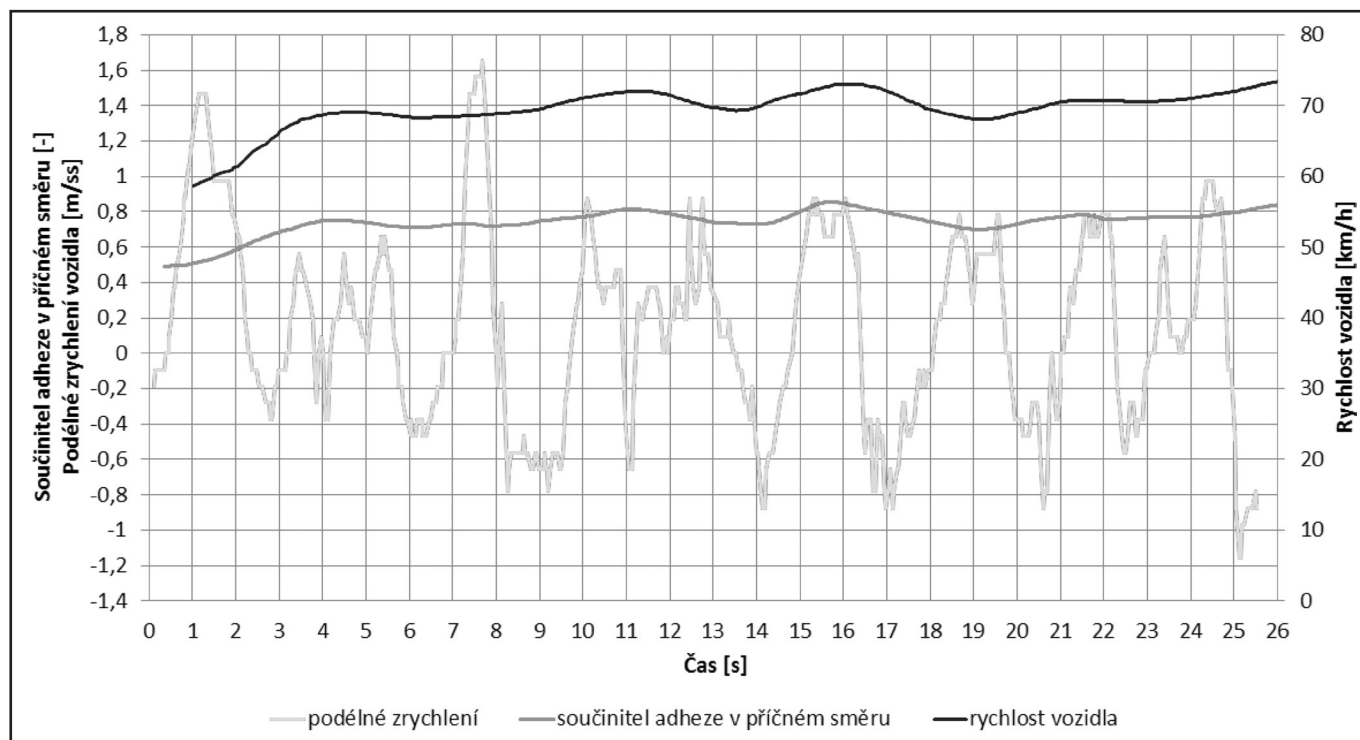
5.1 Kruhová zkouška č. M1

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem s aktivovaným systémem ESP na hranici zásahu systému ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem takovou rychlostí vozidla, která se nacházela velmi blízko referenční rychlosti zásahu systému ESP, což se podle tab. 1 podařilo. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje obr. 7. Souhrnný průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, využívaného součinitele adheze v příčném směru a podélného zrychlení v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje obr. 8. Z naměřených parametrů při jízdní zkoušce je možno určit okamžiky zásahu systému ESP dle tab. 1. Z tab. 1 jsou zřejmé jednotlivé zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce. Např. v čase kruhové zkoušky 8,34419 sekundy došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 2 tab. 1). Tyto regulační zásahy systému ESP odpovídají průběhu podélného zrychlení na obr. 8. Nutno uvést, že ne všechny výrazné nárůsty či poklesy křivky podélného zrychlení na obr. 8 jsou způsobeny zásahem systému ESP. Protože se řidič snažil s vozidlem pohybovat na hranici zásahu systému ESP, jsou některé nárůsty a poklesy podélného zrychlení důsledkem ovládání vozidla řidičem, zejména práce řidiče s pedálem akcelérátoru (viz obr. 8 od času 0 až 7 sekundy). Z obr. 7 je patrné, že během kruhové zkoušky v blízkosti mezní rychlosti průjezdu obloukem se hodnota součinitele adheze v příčném směru pohybovala v rozmezí 0,70 až 0,86 (pozn. v čase 0 až 4 sekundy probíhalo zrychlování vozidla na rychlost blízkou mezní hodnotě v oblouku, což se projevilo i na průběhu křivky



Obr. 7 Kruhová zkouška č. M1 trvalá jízda obloukem při počátcích zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy a součiniteli adheze v příčném směru na čase).

Figure 7 Circular test no. M1 – permanent driving in the circle at the beginnings of the intervention system ESP (dependence of the speed on the coefficient of adhesion in the lateral direction at the time).



Obr. 8 Kruhová zkouška č. M1 – trvalá jízda obloukem při počáteční zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy, součinitele adheze v příčném směru a podélného zrychlení na čase).

Figure 8 Circular test no. M1 – permanent driving in the circle at the beginnings of the intervention system ESP (dependence of the driving speed, a coefficient of adhesion in the lateral direction and longitudinal acceleration at the time).

Tab. 1 Kruhová zkouška č. M1 – zaznamenané údaje při kruhové zkoušce (viz sloupce tabulky).

Table 1 Circular test no. M1 – recorded data in a circular test (see table columns).

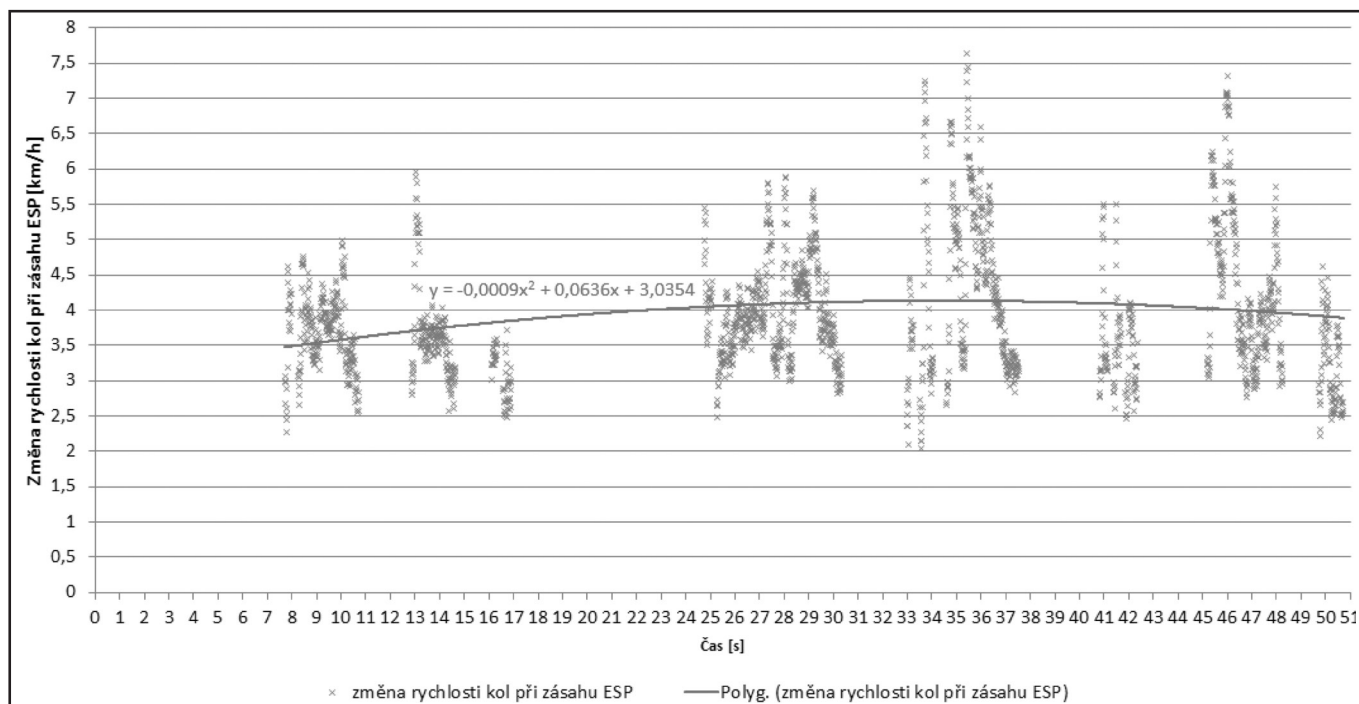
Čas	Zásah ESP	LZ kolo [km/h]	PZ kolo [km/h]	LP kolo [km/h]	PP kolo [km/h]	Brzdný tlak [bar]	Podélné zrychlení [m/ss]	Stáčivá rychlost [°/s]	Úhel natočení volantu [°]
8,33386	1	66,53	69,14	69,64	69,67	0,0	-0,56250	20,75	108,5875
8,34419	1	66,43	68,99	69,61	69,67	0,5	-0,56250	20,15	108,5875
8,35397	1	66,24	69,17	69,45	69,62	0,0	-0,56250	21,43	108,5875
8,36424	1	66,13	69,07	69,74	69,61	0,5	-0,46875	21,21	107,1000
8,37393	1	66,05	69,40	69,96	69,67	0,0	-0,56250	20,93	107,1000
8,38420	1	65,87	69,42	69,83	69,79	0,3	-0,46875	21,47	107,1000
8,39389	1	65,77	69,35	69,64	69,76	0,5	-0,56250	20,22	107,1000
8,40424	1	65,47	69,28	69,67	69,79	0,1	-0,56250	21,28	107,1000
8,41397	1	65,08	69,19	69,73	69,72	0,3	-0,56250	21,21	107,1000

součinitele adheze v příčném směru, kdy rychlosti vozidla cca 60 km/h v oblouku odpovídá hodnota součinitele adheze v příčném směru cca 0,5).

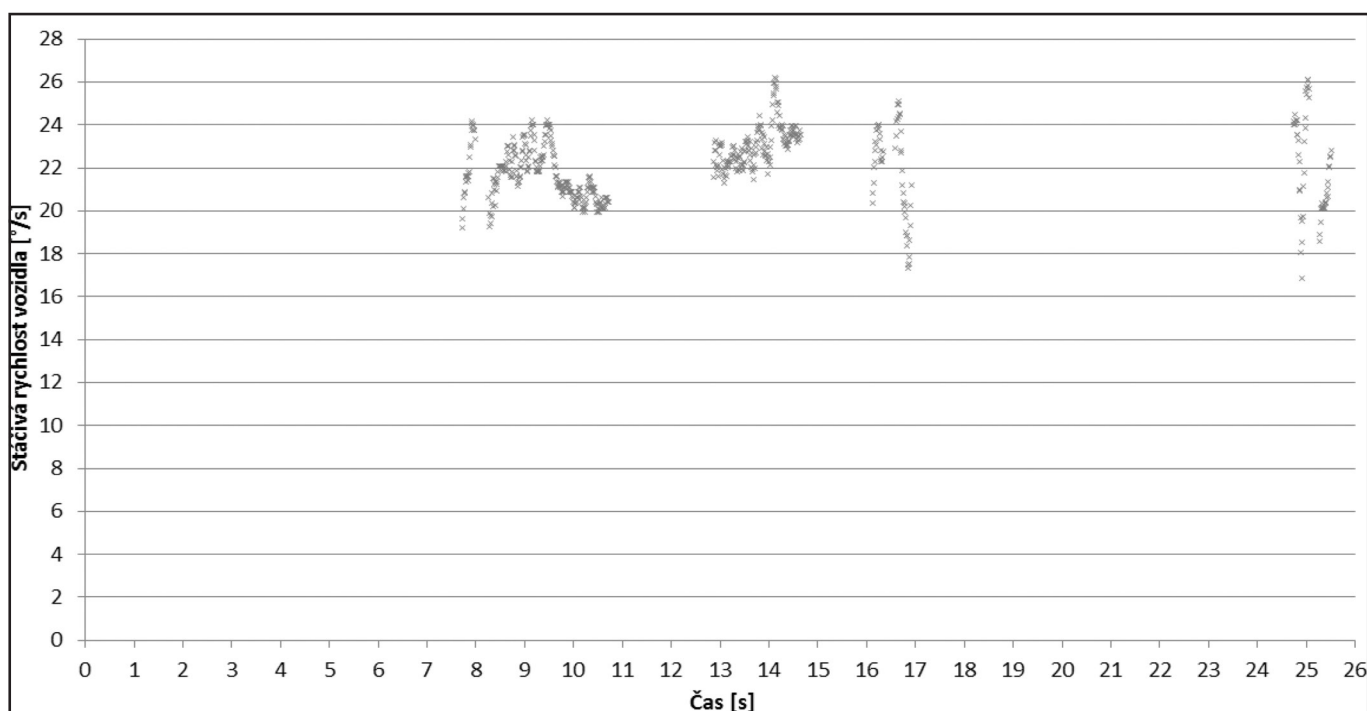
Z tab. 1 je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na obr. 9 vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M1. Křivka na obr. 9 vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna obvodové rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 2,0 až 7,6 km/h. Zjištěné rozmezí je relativně nízké, což však odpovídá

metodice průběhu kruhové zkoušky č. M1, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem pouze takovou rychlostí vozidla, která se nacházela velmi blízko referenční rychlosti zásahu systému ESP.

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na obr. 10 vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M1. Z polohy vynesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 17 až 26 °/s, což odpovídá cca 0,3 až 0,45 rad/s.



Obr. 9 Kruhová zkouška č. M1 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.
Figure 9 Circular test no. M1 – change of the speed of the wheels while ESP intervention during the test.



Obr. 10 Kruhová zkouška č. M1 – hodnoty stálé rychlosti vozidla při zásazích ESP.
Figure 10 Circular test no. M1 – the values of the yaw rate of the vehicle when interventions ESP.

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku o poloměru 51 m:

Využitelný součinitel adheze v příčném směru byl z grafů na obr. 7 a obr. 8 zjištěn v rozmezí 0,70 až 0,86. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 51 m vypočteme ze známého vztahu pro zjednodušený případ vyplývající s geometrických parametrů polygonu:

$$v_{mez} = \sqrt{\mu_{pr} \cdot g \cdot R} = \sqrt{(0,70 \text{ až } 0,86) \cdot 9,81 \cdot 51} = 18,7 \text{ až } 20,7 \text{ m/s} = 67 \text{ až } 75 \text{ km/h}.$$

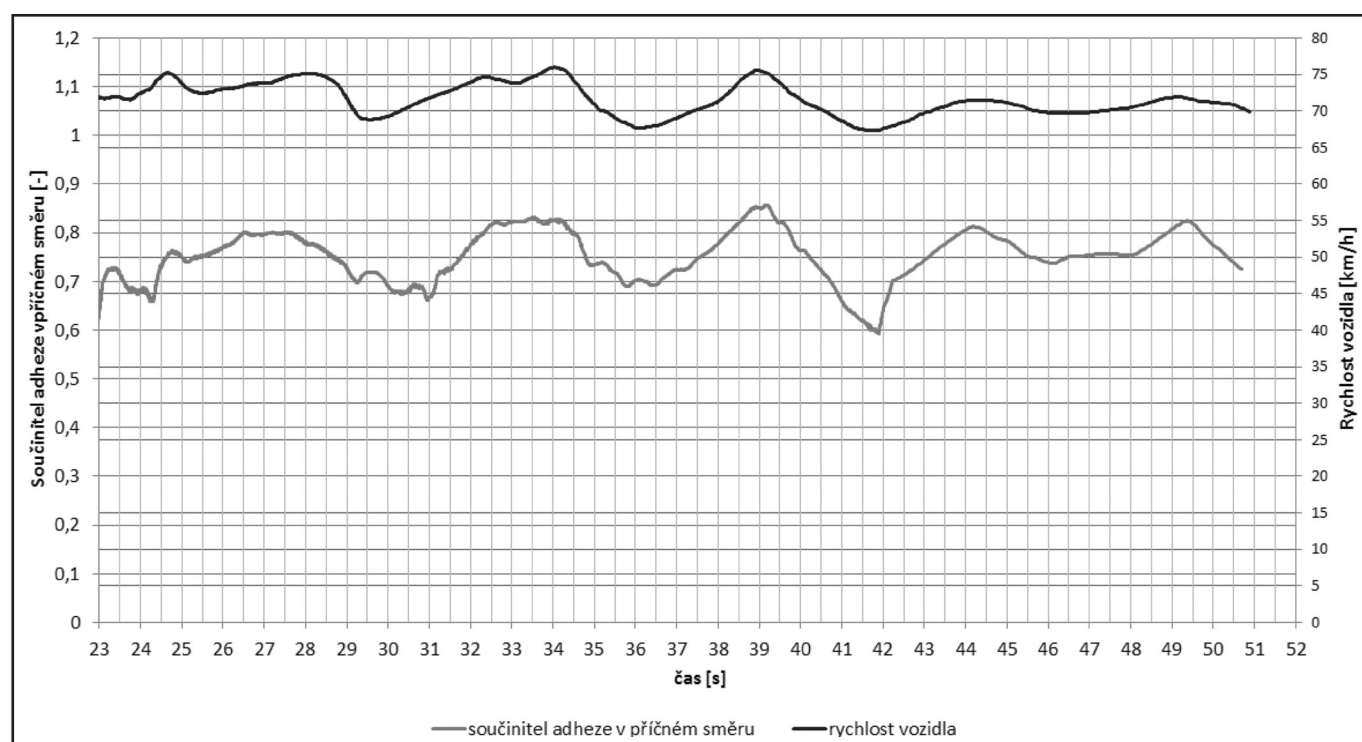
Experimentálně zjištěná rychlost vozidla v oblouku (viz obr. 7 a obr. 8) se nacházela v rozmezí 68 až 74 km/h, které spadá do analyticky stanoveného rozmezí mezní rychlosti vozidla 67

až 75 km/h při experimentálně zjištěném využitelném součiniteli adheze v příčném směru v rozmezí 0,70 až 0,86. Obvodová rychlost jednotlivých kol vozidla se např. při zásazích systému ESP v časovém rozmezí 8,33386 až 8,41397 sekundy kruhové zkoušky č. M1 nacházela v rozmezí cca 65 až 70 km/h (viz tab. 1). Nutno dodat, že řidič se s vozidlem nesnažil obloukem pohybovat s maximálním využitím adheze v příčném směru se zasahujícím systémem ESP, ale pouze hledal hranici, kdy začne systém ESP zasahovat. Hranice zásahů systému ESP byla evidentně nalezena, protože systém ESP již začal mírně do jízdní dynamiky zasahovat. Tvzení, že se jednalo pouze o mírnější zásahy systému ESP lze dovodit z obr. 9, ze kterého je zřejmé rozmezí změny obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla při zásazích systému ESP pouze 2,0 až 7,6 km/h. Z pohledu vnějších pozorovatelů i posádky se vozidlo v oblouku chovalo velmi stabilně bez zřetelného náznaku

ztráty směrové stability. Školená posádka zaznamenala mírné zásahy systému ESP do jízdní dynamiky.

5.2 Kruhová zkouška č. M2

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem s aktivovaným systémem ESP s maximálně možným výkonem vozidla v oblouku. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí, kterou systém ESP vozidlu umožnil. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje obr. 11. Z obr. 11 a tab. 2 je zřejmé, že při plném využití systému ESP, jehož zásahy při průjezdu obloukem pociťovala posádka vozidla zřetelně a jež jsou zřejmé z tab. 2, se mezní rychlost průjezdu vozidla obloukem dostala dokonce krátkodobě nad 75 km/h. V čase 39,0 sekund se rychlost vozidla při kruhové zkoušce dostala nad 75 km/h při hodnotě adheze v příčném směru



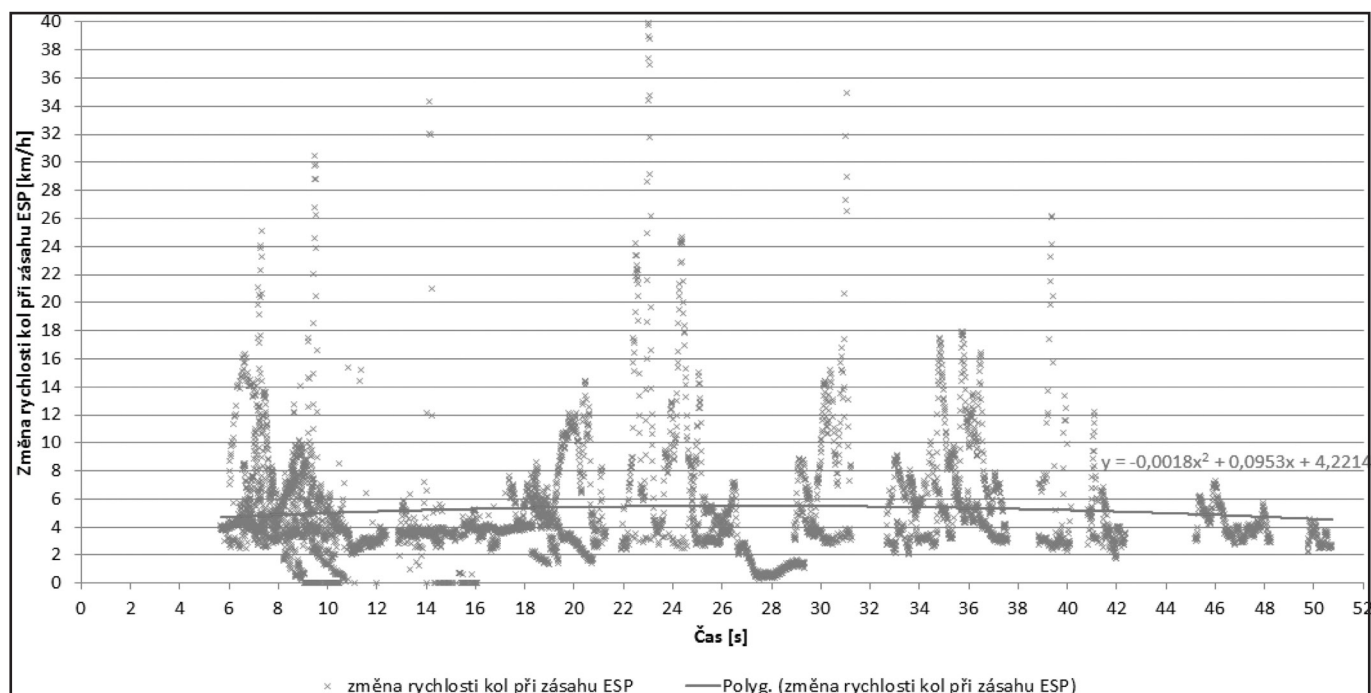
Obr. 11 Kruhová zkouška č. M2 trvalá jízda obloukem maximální rychlostí se systémem ESP (závislost rychlosti jízdy a součinitele adheze v příčném směru na čase).

Figure 11 Circular test no. M2 – permanent driving in the circle at maximum speed with ESP (dependence of the speed on the coefficient of adhesion in the lateral direction at the time).

Tab. 2 Kruhová zkouška č. M2 – zásah ESP, obvodové rychlosti kol v čase cca 39 s.

Table 2 Circular test no. M2 – ESP interventions, speeds of wheels at the time of about 39 s.

Čas	Zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo [km/h]	PZ kolo [km/h]	LP kolo [km/h]	PP kolo [km/h]
38,9916	1	0	0	71,00	75,50	77,83	77,10
38,9925	0	0	0	71,10	75,53	78,37	77,02
39,0021	1	0	0	71,00	73,38	73,78	74,07
39,0027	0	0	0	71,00	73,33	73,70	73,91
39,0116	1	0	0	71,02	75,61	78,40	77,07
39,0124	0	0	0	70,85	75,69	78,86	76,99
39,0221	1	0	0	70,91	73,25	73,99	73,93
39,0226	0	0	0	70,83	73,16	74,01	73,88
39,0317	1	0	1	70,90	75,55	78,61	76,83

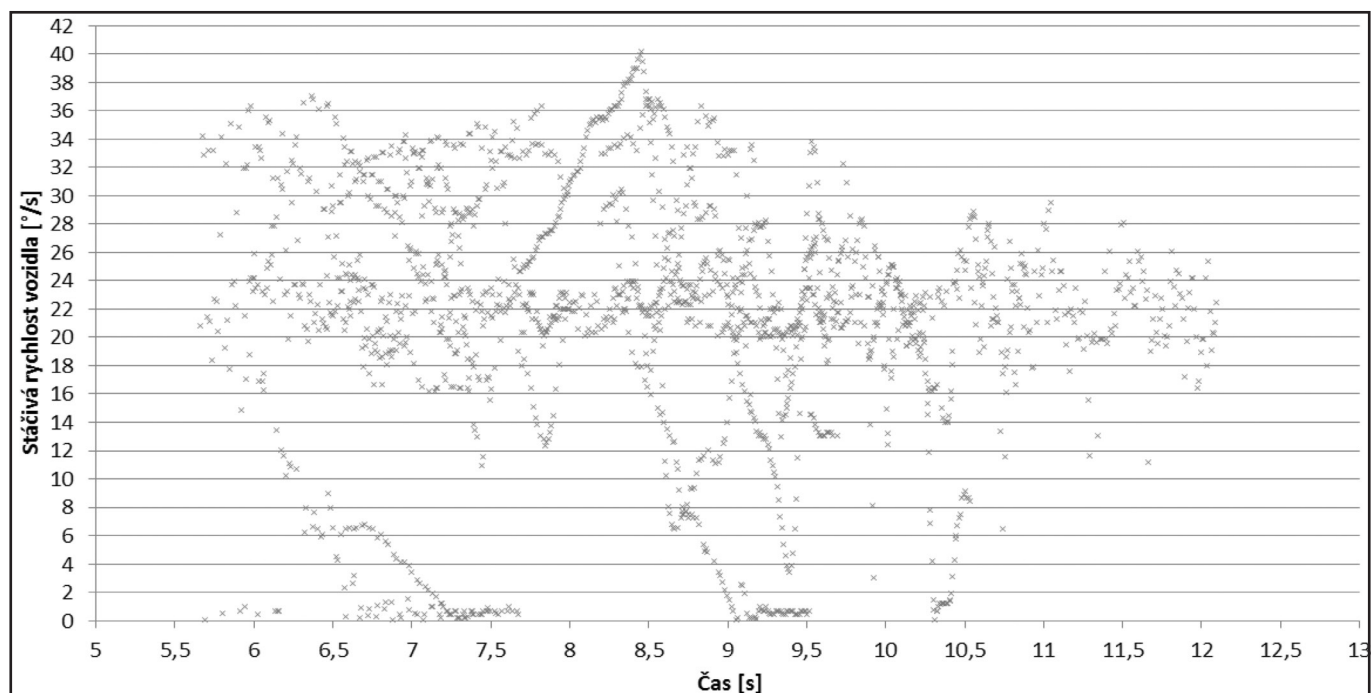


Obr. 12 Kruhová zkouška č. M2 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.
Figure 12 Circular test no. M2 – change of the speed of the wheels while ESP intervention during the test.

cca 0,85 (viz obr. 11). Z obr. 11 je patrné, že během kruhové zkoušky při maximální rychlosti průjezdu obloukem se hodnota využívaného součinitele adheze v příčném směru pohybovala v rozmezí 0,60 až 0,85.

Z tab. 2 je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na obr. 12 vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové

zkoušky č. M2. Křivka na obr. 12 vznikla proložení polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 40 km/h. Zjištěné rozmezí je podstatně širší oproti rozmezí z kruhové zkoušky č. M1, což však opět odpovídá metodice průběhu kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální



Obr. 13 Kruhová zkouška č. M2 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP.
Figure 13 Circular test no. M2 – the values of the yaw rate of the vehicle when interventions ESP.

rychlostí vozidla, kterou systém ESP vozidlu umožnil. V čase zkoušky cca 23 sekund dokonce vnější pozorovatel rozpoznal výrazné zpomalení levého zadního kola vozidla při zásahu ESP (tj. v okamžiku, kdy byla změna rychlosti otáčení kol nejvyšší).

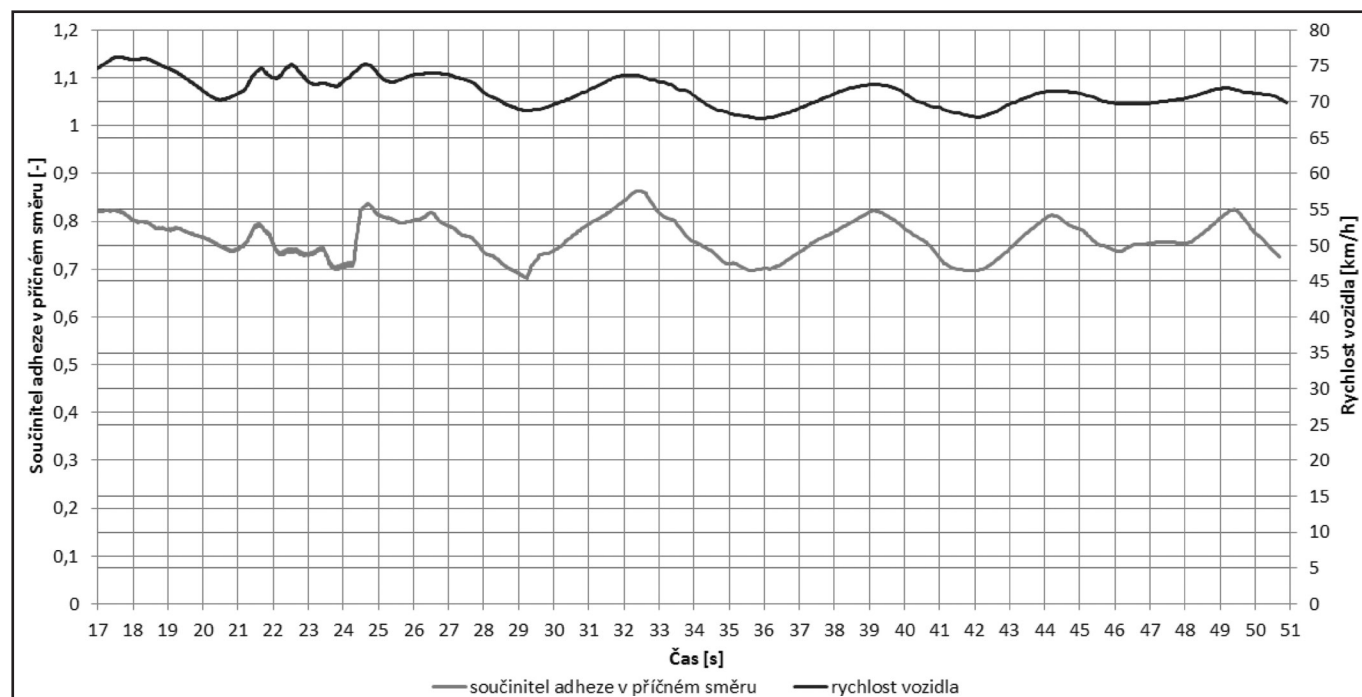
Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčívé rychlosti vozidla. Proto byly na obr. 13 vyneseny hodnoty stáčívé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M2. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčívých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčívé rychlosti cca 1 až 40 °/s, což odpovídá cca 0,02 až 0,7 rad/s. Zjištěné rozmezí hodnot stáčívé rychlosti je podstatně širší oproti rozmezí z kruhové zkoušky č. M1, což však opět odpovídá metodice průběhu kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlosti vozidla, kterou systém ESP vozidlu umožnil. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M2 nachází v rozmezí hodnot stáčívé rychlosti 20 až 26 °/s, což odpovídá cca 0,35 až 0,45 rad/s. Nejvyšší dosažená hodnota stáčívé rychlosti vozidla byla zaznamenána v čase cca 8,5 s, kdy dosáhla hodnota stáčívé rychlosti vozidla až 40 °/s, což odpovídá hodnotě 0,7 rad/s, kdy se vozidlo při kruhové zkoušce již pohybovalo na hranici smyku se zanecháním smykových stop „pískajících“ pneumatik.

5.3 Kruhová zkouška č. M3

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem, před kterou byl tlačítkem na desce přístrojů v interiéru vozidla deaktivován

systém ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem mezní rychlostí, tj. rychlostí na hranici směrové stability vozidla v oblouku. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje obr. 14. Zásadním zjištěním při analýze naměřených dat byly detekované zásahy systému ESP do jízdní dynamiky pohybu vozidla, ačkoliv byl systém ESP před kruhovou zkouškou řidičem běžným způsobem (tlačítkem) deaktivován. V okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace řidič jednotkou stabilizačního systému, kdy se vozidlo již dlouhodoběji pohybovalo na hranici stability, byl v čase 24,7634 sekundy systém ESP automaticky (tj. bez vlivu řidiče) aktivován. Z tab. 3 jsou zřejmé jednotlivé zásahy stabilizačního systému ESP, regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce. Např. v čase kruhové zkoušky 24,7634 sekundy došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 1 tab. 3). Hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,68 až 0,82 (vyjma okamžiku v čase cca 32,5 sekundy, kdy byl opět detekován zásah systému ESP, vzrostla hodnota součinitele adheze v příčném směru na 0,86). Z pohledu vnějšího pozorovatele byl stejně jako při kruhové zkoušce č. M2 zřetelný hluk (pískání) od pneumatik.

Z tab. 3 je zřejmé, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně rychlosti otáčení jednotlivých kol vozidla. Proto byla na obr. 15 vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M3. Křivka na obr. 15 vznikla proložení polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je



Obr. 14 Kruhová zkouška č. M3 – jízda obloukem s deaktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy a součiniteli adheze v příčném směru na čase).

Figure 14 Circular test no. M3 – driving in the circle with deactivated system ESP (dependence of the speed and the coefficient of adhesion in the lateral direction at the time).

Tab. 3 Kruhová zkouška č. M3 – tlačítkem deaktivované ESP; v čase 24,7634 s první zásahy systému ESP (systém automaticky aktivován bez zásahu posádky).

Table 3 Circular test no. M3 – ESP button is deactivated; 24.7634 at the time of the first intervention system (ESP system is automatically activated without the intervention of the crew).

Čas	Zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo [km/h]	PZ kolo [km/h]	LP kolo [km/h]	PP kolo [km/h]
24,7634	1	0	0	69,83	72,29	74,48	72,44
24,7663	0	0	1	72,00	74,78	78,86	76,04
24,7731	1	0	0	69,99	72,05	74,97	72,52
24,7756	0	0	1	72,10	74,86	78,52	76,18
24,7834	1	0	0	69,98	71,93	75,25	72,60
24,7863	0	0	1	72,03	74,91	78,31	76,00
24,7930	1	0	0	69,61	71,73	74,99	72,34
24,7958	0	0	1	71,95	74,80	77,86	76,10
24,8032	1	0	0	69,03	71,70	74,24	72,20
24,8063	0	0	1	71,80	74,72	77,65	76,15
24,8129	1	0	0	68,58	71,66	73,43	72,20
24,8160	0	0	1	71,98	74,67	77,36	75,83
24,8231	1	0	0	68,44	71,45	72,83	72,71

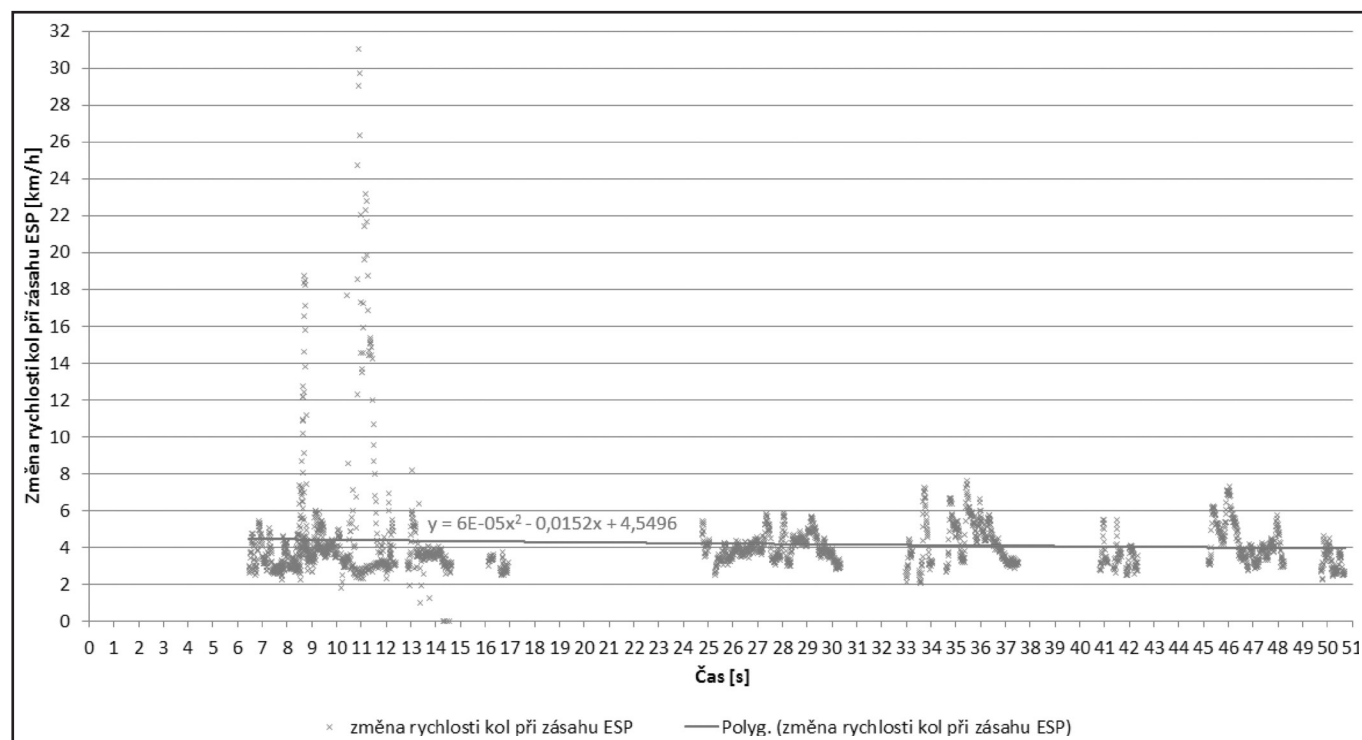
zřejmé, že změna obvodové rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 31 km/h.

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na obr. 16 vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M3. Z polohy vynesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé,

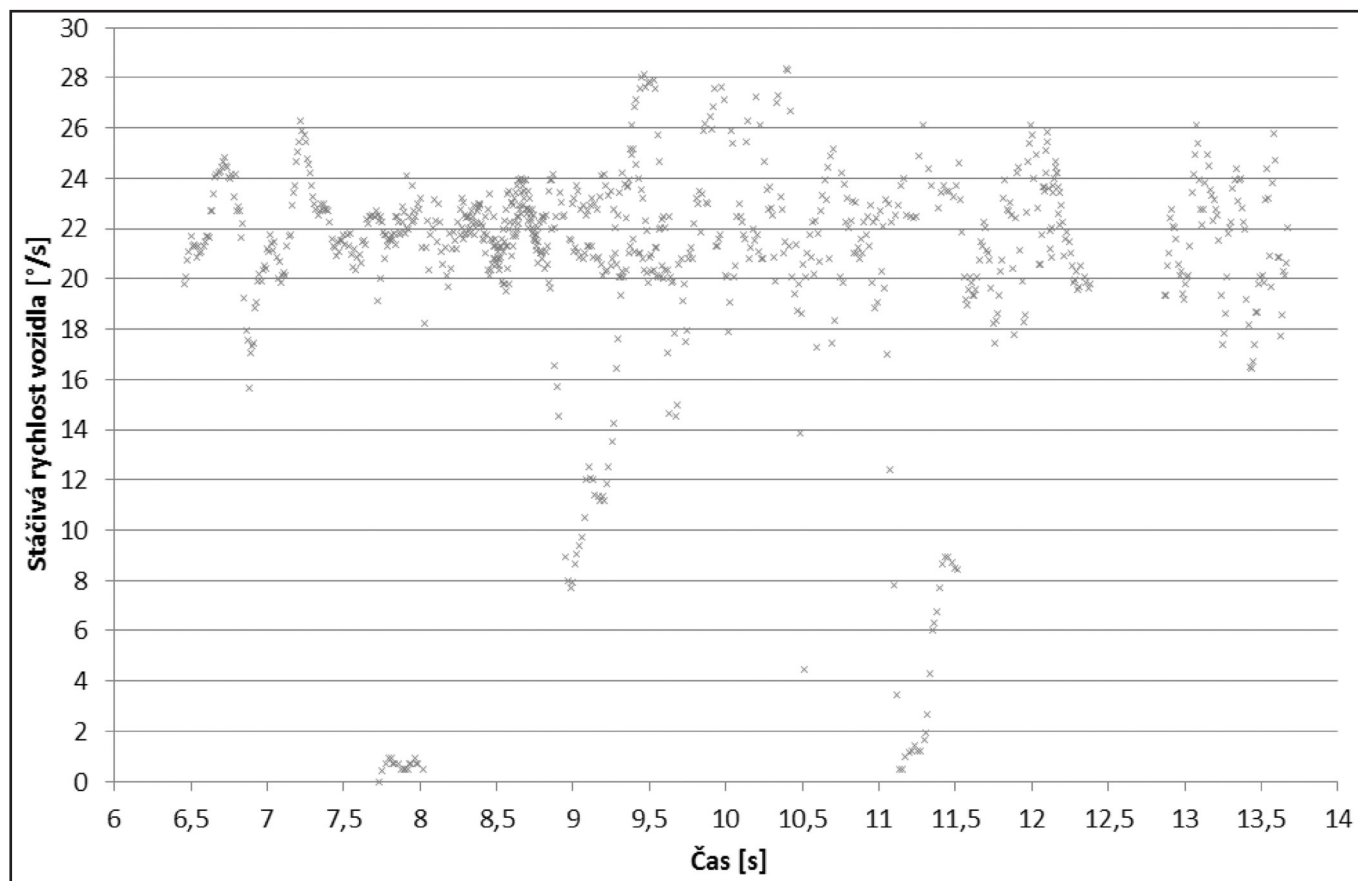
že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 1 až 28 °/s, což odpovídá hodnotě 0,02 až 0,5 rad/s. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M3 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 20 až 26 °/s, což odpovídá hodnotě 0,35 až 0,45 rad/s.

5.4 Kruhové zkoušky č. M4, M5, M6, M7 a M8

S ohledem na rozsah článku jsou kruhové zkoušky č. M4, M5, M6, M7 a M8 pouze stručně okomentovány, ale jejich výsledky



Obr. 15 Kruhová zkouška č. M3 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.
Figure 15 Circular test no. M3 – change of the speed of the wheels while ESP intervention during the test.



Obr. 16 Kruhová zkouška č. M3 – hodnoty stáčívé rychlosti vozidla při zásazích ESP.
Figure 16 Circular test no. M3 – the values of the yaw rate of the vehicle when interventions ESP.

jsou obsaženy v závěrečném shrnutí a vyhodnocení provedených experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky při uskutečněných kruhových zkouškách. Kompletní grafické výstupy a analýza výsledků všech kruhových zkoušek jsou součástí disertační práce autora článku.

Při kruhové zkoušce č. M4 se jednalo o jízdu obloukem mezní rychlostí vozidla s (tlačítkem) deaktivovaným systémem ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem s maximálním využitím adheze v příčném směru. Opakovaným zjištěním při analýze naměřených dat byly detekovány zásahy systému ESP do jízdní dynamiky pohybu vozidla, ačkoliv byl systém ESP před kruhovou zkouškou řidičem běžným způsobem (tlačítkem) deaktivován. Kruhová zkouška č. M4 byla v podstatě opakovaným měřením kruhové zkoušky č. M3.

Jelikož bylo provedenými experimenty prokázáno, že při deaktivaci stabilizačního systému ESP běžným uživatelským způsobem se systém v okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace automaticky aktivuje a snaží se nastatou kritickou jízdní situaci odvrátit a vozidlo směrově stabilizovat, byly další kruhové zkoušky č. M5 až M8 provedeny s aktivovaným systémem ESP i s ohledem na situaci, že u dnešních moderních vozidel není možné systém běžně řidičem deaktivovat; lze pouze u určitých typů vozidel měnit provozní režimy stabilizačního systému (např. režim sportovní a režim normální). Zkušební řidič se při kruhových zkouškách s vozidlem snažil pohybovat obloukem mezní rychlostí. Průjezd obloukem se vnějšmu pozorovateli jevil jako kritická

jízda blízko hranice stability. Řidič se plně a soustředěně věnoval plynulému průjezdu po stanovené trajektorii oblouku, čímž byl zaručen přibližně konstantní úhel natočení volantu.

6. SHRNTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

Provedenými experimenty – kruhovými zkouškami č. M3 a M4 bylo prokázáno, že při deaktivaci stabilizačního systému ESP běžným uživatelským způsobem, tj. tlačítkem v interiéru vozidla, se systém v okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace automaticky aktivuje a snaží se vzniklou kritickou jízdní situaci odvrátit a vozidlo směrově stabilizovat (viz tab. 3). Tedy prakticky při všech uskutečněných kruhových zkouškách byl v jejich průběhu zaznamenán zásah stabilizačního systému ESP.

Tabelárně uspořádané naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla Škoda Octavia II při provedených kruhových zkouškách se zásahy systému ESP jsou souhrnně uvedeny v tab. 4.

Z tab. 4 je zřejmé rozmezí využívaného součinitele adheze v příčném směru 0,48 až 0,86 při rychlosti vozidla v oblouku v rozmezí 67 až 76 km/h. Analyticky stanovené rozmezí mezní rychlosti vozidla 67 až 75 km/h při experimentálně zjištěném součiniteli adheze v příčném směru v rozmezí 0,70 až 0,86 je téměř shodné s experimentálně zjištěným rozmezím mezní rychlosti vozidla 67 až 76 km/h. Za nutné podmínky dosazení správné

Tab. 4 Shrnutí výsledků z kruhových zkoušek č. M1 až M8.
Table 4 Summary of results of driving in the circle tests no. M1 to M8.

Podmínky měření			Naměřené hodnoty					
Číslo kruhové zkoušky	Poloměr oblouku [m]	Zásahy ESP	Rychlost vozidla v oblouku [km/h]		Součinitel adheze v příčném směru [-]		Změna rychlosti kol Δv_{kol} [km/h]	
			min.	max.	min.	max.	min.	max.
M1	51	Ano	68	74	0,70	0,86	2	7,6
M2	51	Ano	67	76	0,60	0,85	0	40
M3	51	Ano	68	76	0,68	0,86	0	31
M4	51	Ano	72	76	0,59	0,81	0	31
M5	51	Ano	68	72	0,61	0,78	0	31
M6	51	Ano	69	73	0,58	0,79	1,9	31
M7	51	Ano	70	74	0,48	0,64	2	31
M8	51	Ano	73	74	0,53	0,70	2	23
Celkové rozmezí hodnot:			67	76	0,48	0,86	0	40

hodnoty součinitele adheze v příčném směru lze objektivně pro výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku při znalecké činnosti použít analytický vztah.

Změna obvodové rychlosti jednotlivých kol se při zásazích systému ESP pohybovala v rozmezí od 0 až do 40 km/h. Z analyzovaných hodnot jednotlivých změn obvodové rychlosti kol vozidla při kruhových zkouškách je patrné, že převážná většina hodnot změny obvodové rychlosti kol při zásazích ESP se nacházela v rozmezí 2 až 8 km/h.

Hodnoty stáčivé rychlosti vozidla se při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP pohybovaly nejčastěji v rozmezí 17 až 27 °/s, což odpovídá rozmezí cca 0,3 až 0,5 rad/s. Nejvyšší dosažená hodnota stáčivé rychlosti vozidla byla zaznamenána při nejdynamičtějším průjezdu při kruhové zkoušce č. M2, kdy v čase cca 8,5 sekundy dosáhla hodnota stáčivé rychlosti vozidla až 40 °/s, což odpovídá hodnotě 0,7 rad/s, kdy se vozidlo při kruhové zkoušce již pohybovalo na hranici smyku se zanecháním smykových stop „pískajících“ pneumatik.

7. ZÁVĚR

Z pohledu výkonu znalecké činnosti v oboru doprava je třeba při komplexní analýze pohybu vozidla v obecném prostorovém oblouku ve výpočtu prostřednictvím analytického vztahu mezní rychlosti či s podporou počítačového simulačního programu vycházet ze správných, skutečně využitelných hodnot součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou v příčném směru a skutečných geometrických parametrů vozovky. Pokud budou tyto podstatné vstupní veličiny správně dosazeny do analytického vztahu pro výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku, bude analyticky stanovená mezní rychlost vozidla v oblouku odpovídat experimentálně dosažené rychlosti vozidla při průjezdu obloukem s dobrou přesností.

8. LITERATURA

- [1] BRADÁČ A.: *Soudní inženýrství*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 1999. ISBN 80-7204-057-X
- [2] JANÍČEK P.: *Systémová metodologie: Brána do řešení problémů*. Vyd. 1. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2014, 1 sv. ISBN 978-80-7204-887-8
- [3] BURG H., MOSER A.: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*. 2. vyd. Vieweg Teubner, Wiesbaden, 2009, 1032 s. ISBN 978-3-8348-0546-1
- [4] PANÁČEK V.: Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku. *Silnice a železnice*, 2008(2), 2008, s. 18–23. ISSN 1801-822X.
- [5] http://www.racelogic.co.uk/_downloads/vbox/Manuals/Data_Loggers/RLVB3i_Manual%20-%20English.pdf
- [6] <https://www.google.cz/maps/@50.4503199,15.0208721,2695m/data=!3m1!1e3>
- [7] PANÁČEK V.: *Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h*. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Brno, 2015, 187 s. textu, 152 s. příloh.