
**POROVNÁNÍ VÝPOČTU EES DLE LINEÁRNÍ A REÁLNÉ DEFORMAČNÍ
CHARAKTERISTIKY**

**COMPARISON OF COMPUTATION OF EES BY THE LINEAR AND THE REAL
DEFORMATION CHARACTERISTIC**

Tomáš Coufal⁴⁰

ABSTRAKT:

Článek poukazuje na odlišnosti mezi výpočtem EES dle lineární a dle reálné deformační charakteristiky. Reálná deformační charakteristika je získána vyhodnocením a zpracováním dat z čelní nárazové zkoušky. Porovnán je výpočet EES s pomocí reálné deformační charakteristiky s výpočtem EES s pomocí lineární deformační charakteristiky, kterou využívá výpočetní program Crash 3.

ABSTRACT:

Comparison of computation of EES by the linear and real deformation characteristic is showed in the article. The real deformation characteristic is obtained by evaluating and processing the data from the frontal crash test. Further on, the computation of EES from real deformation characteristic and the computation of EES from linear deformation characteristic which is used by the computing software Crash 3 are compared.

KLÍČOVÁ SLOVA:

EES, náraz, vozidlo, deformace, soudní inženýrství.

KEYWORDS:

EES, impact, vehicle, deformation, forensic engineering.

1 ÚVOD

V rámci technických posudků o příčinách dopravních nehod se ve většině případů provádí komplexní analýza nehodového děje, jehož nedílnou součástí je, mimo jiné, řešení vlastního střetu vozidel. Při řešení vlastního střetu vozidel je jedním z důležitých parametrů určení energetické ztráty, respektive deformační energie vozidla při nárazu do překážky. Tato energetická ztráta je způsobena zmařením, respektive přeměnou kinetické energie vozidla, která je dána okamžitou rychlostí jízdy vozidla, na deformační energii pohlcenou jeho deformačními zónami. Na množství deformační energie pohlcené deformačními zónami vozidla během nárazu závisí celkový pohyb vozidla během nehodového děje, zejména pak výpočet rychlosti jízdy vozidla těsně před nárazem. K exaktnímu určení deformační energie z rozsahu vzniklé deformace je nutná znalost deformační charakteristiky příslušné zdeformované části vozidla. Ve znalecké praxi se k určení energetické ztráty vozidla při nárazu nejčastěji užívá odborný odhad ekvivalentní energetické rychlosti EES, která vyjadřuje kinetickou energii vozidla úměrnou deformační práci potřebnou k dosažení příslušného stupně deformace. Ekvivalentní energetická rychlost výrazně ovlivňuje výsledek komplexní analýzy nehodového děje. Nynější dostupné simulační programy pro analýzu dopravních nehod vycházejí při určení hodnoty EES z nárazové rychlosti, hmotnosti, uživatelem

⁴⁰⁾ Coufal, Tomáš, Ing. – 1. autor, VUT v Brně, ÚSI, Údolní 53, 602 00 Brno, tomas.coufal@usi.vutbr.cz

definovaného překrytí a koeficientu restituce. Nárazovou rychlost však musí znalec manuálně zadávat dle vlastního výpočtu EES pomocí dostupných metod, u kterých vychází z úrovně poškození předmětného vozidla. Výslednou hodnotu EES v simulačním programu potom musí znalec manuálně sám upravovat dle vlastního výpočtu. Je tedy nezbytné se tímto odvětvím zabývat a udržet tak danou problematiku na co možná nejvyšší úrovni poznání. Současné programy umožňující výpočet EES na základě uživatelem zadané deformace příslušné části vozidla jsou založeny na algoritmech výpočetního programu Crash 3. Základním předpokladem výpočtu EES v programu Crash 3 je lineární závislost mezi působící silou a deformací vozidla, čímž může být do výpočtu vnesena určitá nepřesnost. Cílem tohoto článku je tedy poukázat na konkrétním vozidle na velikost odchylky mezi výpočtem EES s pomocí lineární deformační charakteristiky (aproximující reálný průběh) a mezi výpočtem EES s pomocí reálné deformační charakteristiky.

2 LINEÁRNÍ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKA PŘEDNÍ ČÁSTI VOZIDLA

Lineární deformační charakteristika vozidla je definována jediným koeficientem tuhosti k a aproximuje tak reálnou deformační charakteristiku. Je-li znám koeficient tuhosti k , lze pak snadno, na základě známého poškození vozidla vypočítat deformační energii zmařenou při nárazu a následně vypočítat EES, viz níže. Výhodou lineární deformační charakteristiky je značné zjednodušení výpočtu EES.

Deformační energie E_D je dána vykonáním deformační práce W_D jenž je vykonána nárazovou silou F na dráze x , viz vzorec 1.

$$E_D = W_D = \int_0^x \vec{F} \cdot d\vec{x} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Za předpokladu lineární závislosti mezi silou F a dráhou deformace x , tj. za předpokladu konstantní tuhosti vozidla k , platí vzorec 2.

$$\vec{F} = k \cdot x. \quad [\text{N}] \quad (2)$$

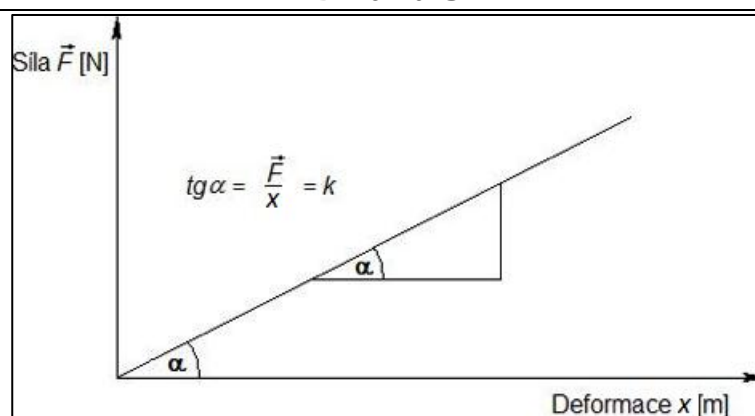
Dosazením vzorce (2) do vzorce (1) dostaneme pro deformační práci vzorec 3.

$$E_D = W_D = \int_0^x k \cdot x \cdot dx. \quad [\text{N}] \quad (3)$$

EES předmětného vozidla se na základě vypočtené deformační práce vypočte dle vzorce 4.

$$\text{EES} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_D}{m}} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Kde:	E_D	[J]	deformační energie spotřebovaná při nárazu vozidla,
	W_D	[J]	deformační práce potřebná k dosažení příslušného stupně deformace,
	F	[N]	nárazová síla,
	m	[kg]	hmotnost vozidla,
	x	[m]	dráha (hloubka) deformace, na které působí nárazová síla,
	EES	[m/s]	energeticky ekvivalentní rychlost vozidla.

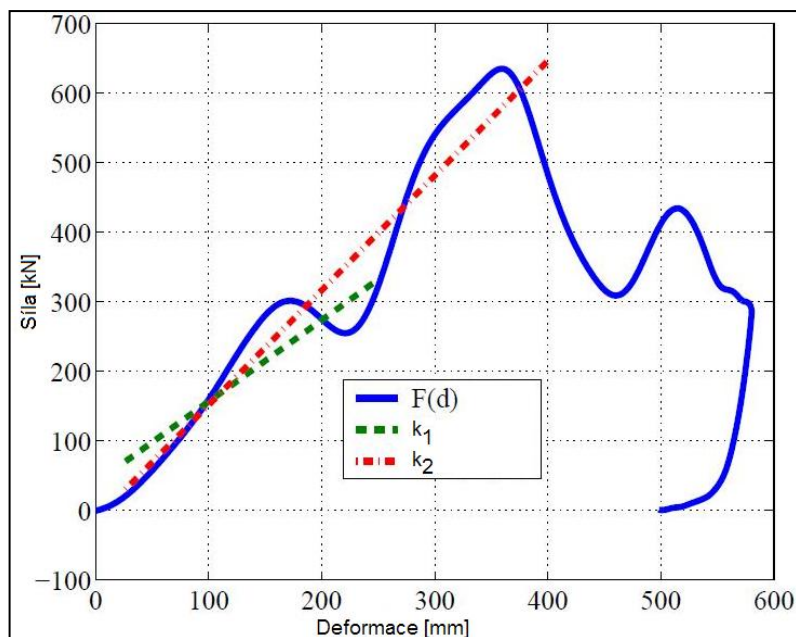


Obr. 1 – Lineární deformační charakteristika.

Fig. 1 – Linear deformation characteristic.

3 REÁLNÁ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKA PŘEDNÍ ČÁSTI VOZIDLA

Deformační charakteristika skutečného vozidla není s postupující deformací konstantní tak, jak je uvažováno v předchozím případě, viz obr. 1. Reálná deformační charakteristika, tj. závislost mezi silou působící na deformovanou přední část vozidla a deformací, je znázorněna na obr. 2, kde modrá křivka znázorňuje skutečný průběh síly v závislosti na postupující deformaci. Zelenou přerušovanou přímkou je proložena spodní část křivky, která je charakterizována tuhostním koeficientem k_1 . Červenou čerchovanou přímkou je proložena horní část křivky, která je charakterizována tuhostním koeficientem k_2 . Z obr. 2 je zřejmé, že lineární proložení deformační charakteristiky jediným koeficientem tuhosti je omezené, protože při větších hloubkách deformací dochází k odchýlení od skutečného průběhu, což může vést k odchýlkám při výpočtu deformační energie, potažmo při výpočtu EES.



Obr. 2 – Reálná a lineární deformační charakteristika. [7]

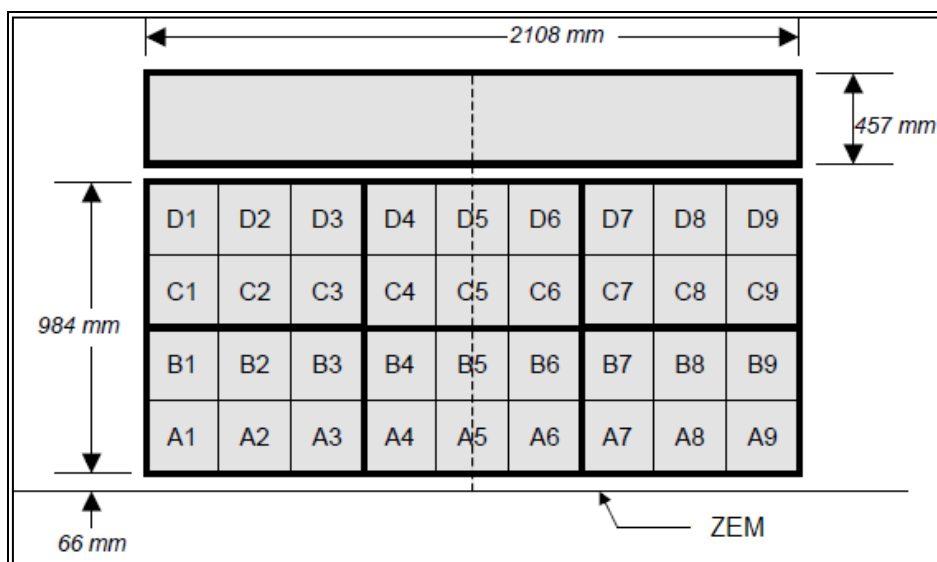
Fig. 2 – Real and linear deformation characteristic. [7]

4 ZÍSKÁNÍ REÁLNÉ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY S POMOCÍ DAT Z ČELNÍ NÁRAZOVÉ ZKOUŠKY

Reálná deformační charakteristika je zpracována pro osobní automobil Audi A4 na základě dat z čelní nárazové zkoušky s plným překrytím prováděné při rychlosti 56 km/h do tuhé bariéry dle NCAP (New Car Assessment Program), viz obr. 3. Tuhá bariéra je osazena snímači síly v sektorech A1 až D9, viz obr. 4. Níže zpracovávaná data jsou čerpána ze zdroje [10].



Obr. 3 – Čelní nárazová zkouška dle NCAP [10]
Fig. 3 – Frontal crash test in accordance with NCAP [10]



Obr. 4 – Testovací bariéra s rozdělením sektorů obsahující snímače síly [10]
Fig. 4 – Testing barrier with location sectors containing load cells [10]

4.1 Zpracování záznamu z akcelerometru umístěném v automobilu

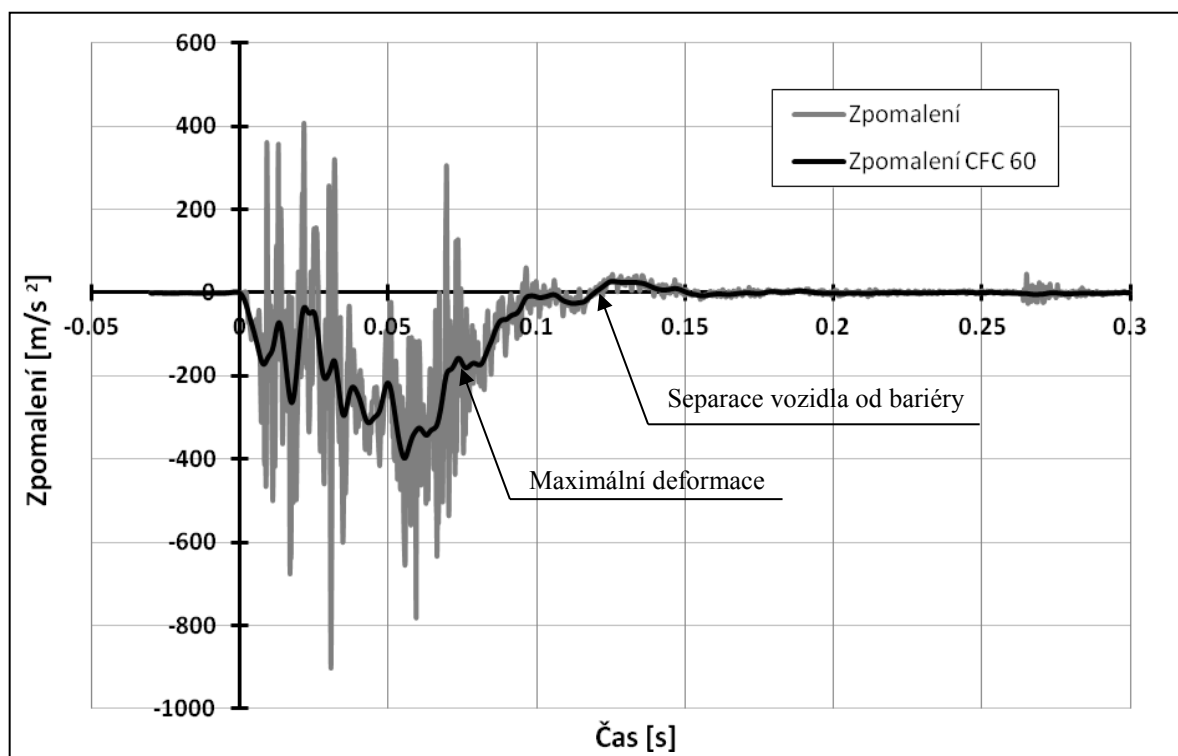
Záznam byl zpracován z akcelerometru pevně umístěném v zadní části karoserie vozidla. Neupravený záznam z akcelerometrů není příliš využitelný z důvodu značné oscilace signálu. Proto jsou data ze snímačů filtrována CFC filtrem (Channel Frequency Class), který se dle literatury [4] používá pro filtrování záznamu ze snímačů při nárazových testech. Pro filtrování záznamu z akcelerometrů umístěných v automobilu byl dle literatury [4] použit filtr CFC 60. Na obr. 5 je znázorněn původní datový signál vyhodnocený z akcelerometru a vyfiltrovaný datový signál příslušným filtrem. Integrací zrychlení podle času (vzorec 5) lze vypočítat záznam rychlosti v čase, viz obr. 6. Dvojnou integrací zrychlení podle času (vzorec 6) lze vypočítat záznam dráhy v čase, viz obr. 7.

$$\bar{v}(t) = \int_{t_1}^{t_2} \bar{a}(t) dt \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

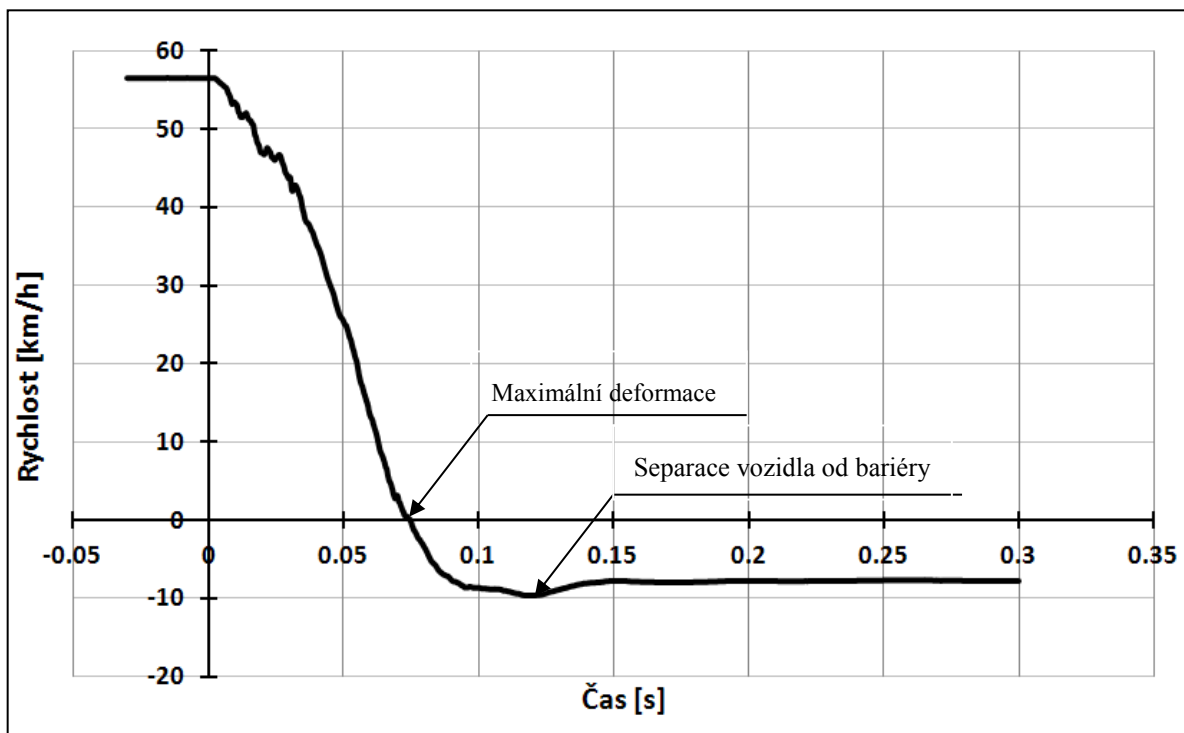
$$s(t) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} \bar{a}(t) dt dt \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Kde: $t_2 - t_1$ [s] perioda s jakou je měřeno zpomalení,

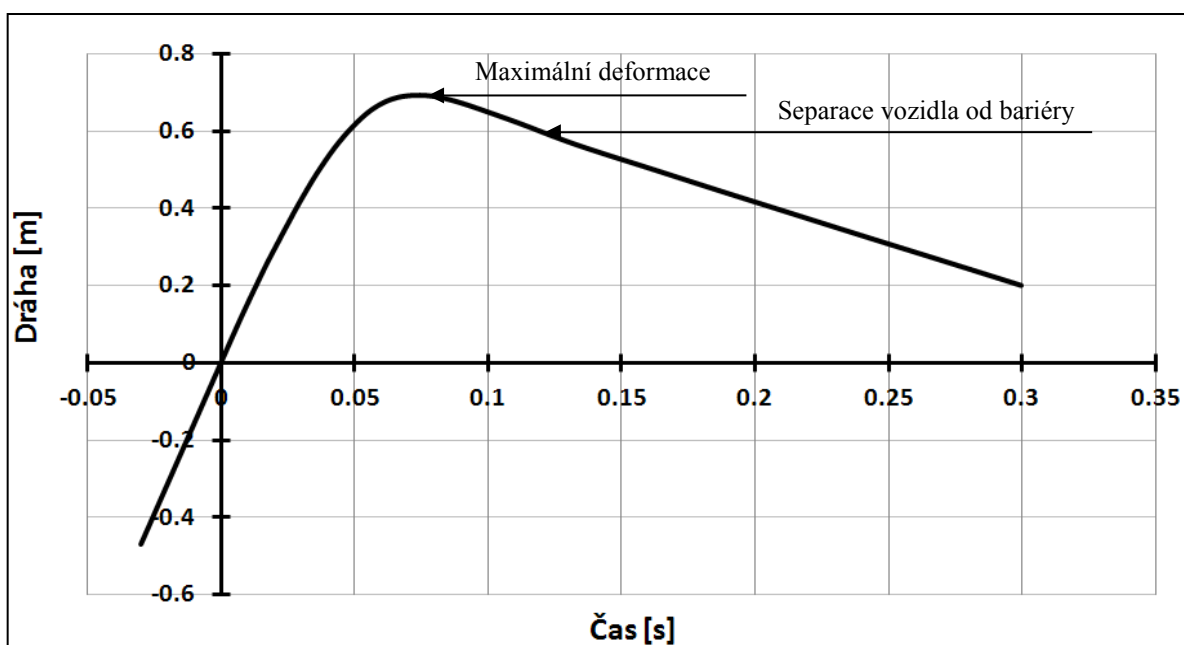
$a(t)$ [m/s^2] aktuální hodnota zpomalení v čase t .



Obr. 5 – Zpomalení vozidla během čelního nárazu.
Fig. 5 – Deceleration of vehicle during the frontal impact.



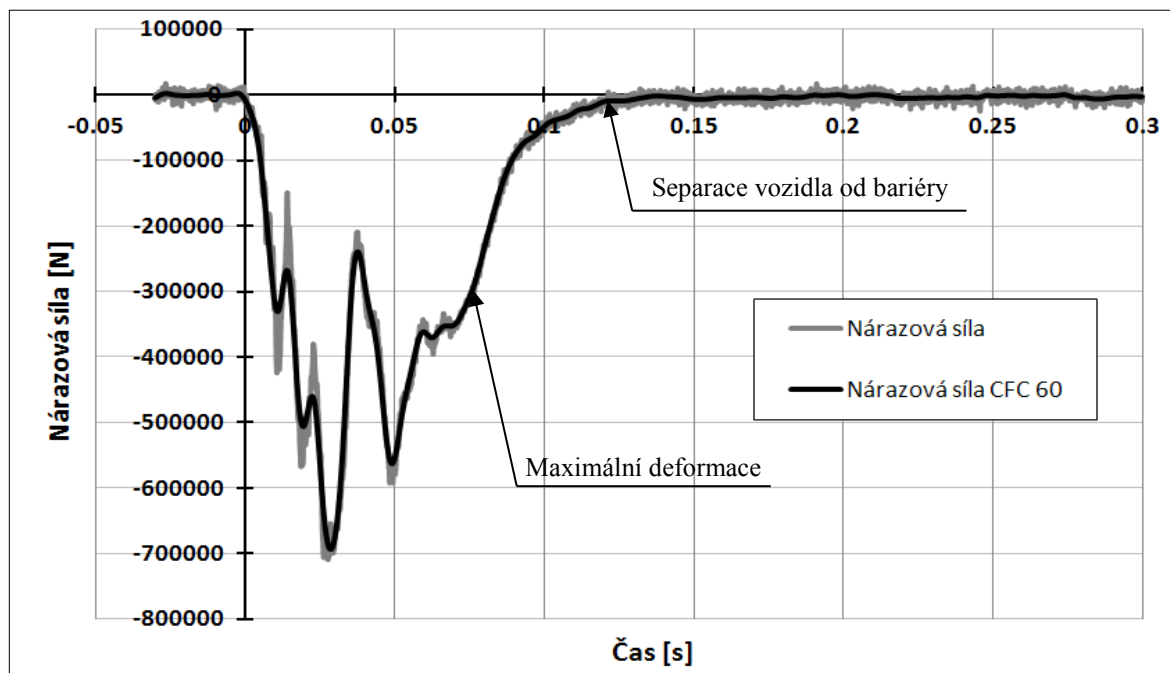
Obr. 6 – Průběh rychlosti vozidla během čelního nárazu.
Fig. 6 – Curve of velocity of vehicle during the frontal impact.



Obr. 7 – Průběh dráhy vozidla během čelního nárazu
Fig. 7 – Curve of displacement of vehicle during the frontal impact

4.2 Zpracování záznamu ze snímačů síly umístěných v bariéře

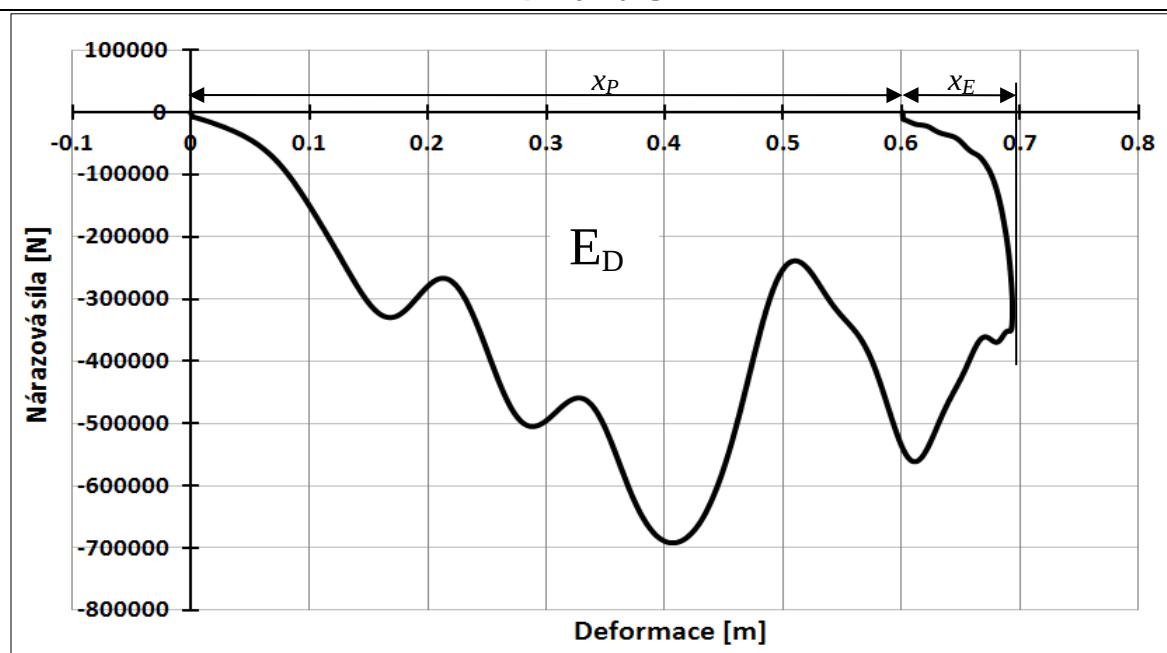
Záznam byl zpracován z jednotlivých snímačů síly umístěných v bariéře, ze kterých je vyhodnocena celková síla působící na vozidlo během nárazu. Záznam síly je dle literatury [4] filtrován filtrem CFC 60. Na obr. 8 je znázorněn původní záznam síly v čase a vyfiltrovaný záznam síly v čase příslušným filtrem.



Obr. 8 – Průběh nárazové síly během čelního nárazu
Fig. 8 – Curve of impact force during the frontal impact

4.3 Vyhodnocení deformační charakteristiky přední části vozidla

Na obr. 9 je vyhodnocena závislost nárazové síly na deformaci vozidla, což je ve své podstatě deformační charakteristika přední části vozidla. Deformace vozidla je vyhodnocena ze záznamu akcelerometru, tj. druhou integrací zpomalení, viz vzorec 6 a obr. 7. Na obr. 9 je zakótována velikost plastické deformace x_P a velikost elastické deformace x_E . Plocha nad křivkou vyjadřuje deformační energii, která je při nárazu spotřebována deformačními zónami vozidla.



Obr. 9 – Deformační charakteristika přední části vozidla Audi A4
 Fig. 9 – Deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4

5 VÝPOČET EES S VYUŽITÍM REÁLNÉ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISITKY PŘEDNÍ ČÁSTI VOZIDLA

Výpočet je sestaven pro vozidlo Audi A4 ze skutečné deformační charakteristiky vozidla, která je uvedena na obr. 9. Tato deformační charakteristika je modifikována tak, aby ji bylo možné využít k výpočtu deformační energie, viz obr. 10. Původní deformační charakteristika je tak posunuta směrem vlevo o vzdálenost, která odpovídá množství elastické části deformační energie E_{DE} , respektive o velikost elastické deformace x_E , protože o tuto velikost se po ukončení nárazu vrátí přední část vozidla zpět. Po ukončení nárazu zůstane tedy přední část vozidla zdeformována o velikost plastické deformace x_P , kterou lze naměřit na vozidle. Z velikosti deformace vozidla lze potom vypočítat deformační energii spotřebovanou deformačními zónami vozidla při nárazu do překážky. Tato deformační energie je dána deformační prací, kterou vykoná nárazová síla F na dráze x .

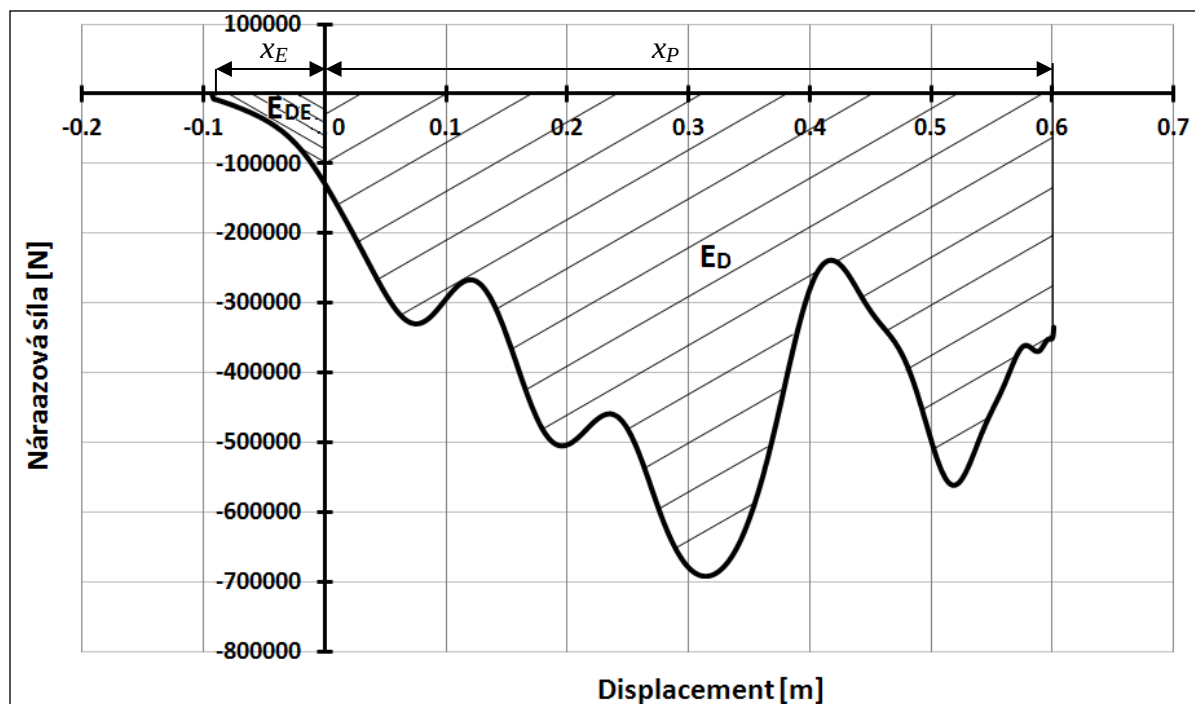
$$E_D = W_D = \int_0^{x_P} \vec{F} \cdot d\vec{x} \quad [\text{J}] \quad (7)$$

Ve znalecké praxi se k určení deformační energie vozidla nejčastěji užívá odborný odhad ekvivalentní energetické rychlosti EES , která vyjadřuje kinetickou energii vozidla úměrnou deformační práci potřebnou k dosažení příslušného stupně deformace.

$$EES = \sqrt{\frac{2 \cdot W_D}{m}} \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

Kde: E_D [J] deformační energie spotřebovaná při nárazu vozidla,

W_D	[J]	deformační práce potřebná k dosažení příslušného stupně deformace,
F	[N]	nárazová síla,
x	[m]	dráha (hloubka) deformace, na které působí nárazová síla,
m	[kg]	hmotnost vozidla,
EES	[m/s]	energeticky ekvivalentní rychlost vozidla.



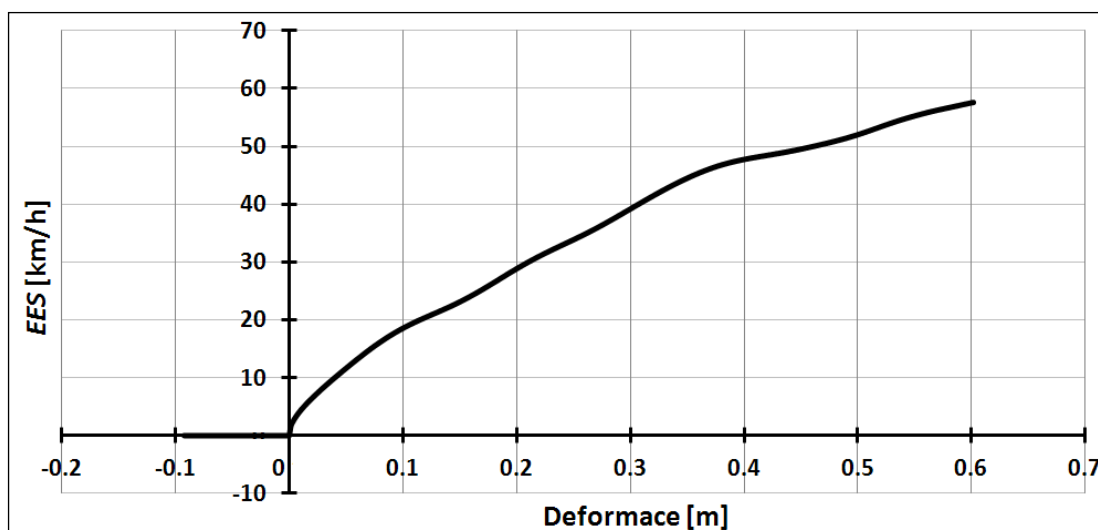
Obr. 10 – Modifikovaná deformační charakteristika přední části vozidla Audi A4

Fig. 10 – Modified deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4

Na základě vzorců 7 a 8 je s pomocí modifikované deformační charakteristiky uvedené na obr. 10 sestaven výpočetní program pro výpočet EES vozidla Audi A4 modelového roku 2011 ze zadané průměrné deformace jeho přední části, viz obr. 11. Na obr. 12 je uvedena závislost EES na velikosti deformace vozidla.

Vozidlo :		Audi A4 2011		
Zadej směr nárazové síly (0°-60°)		v rozmezí		
		od	do	
0	[°]	0	60	[°]
Zadej průměrnou deformaci v metrech		v rozmezí		
		od	do	
0,5	[m]	0	0,601	[m]
Výpočet	EES		Deformační energie E_D	
	[km/h]	[m/s]	[J]	
	52	14,47	204646,3	

Obr. 11 – Výpočetní program EES pro Audi A4
Fig. 11 – Computing program of EES for Audi A4



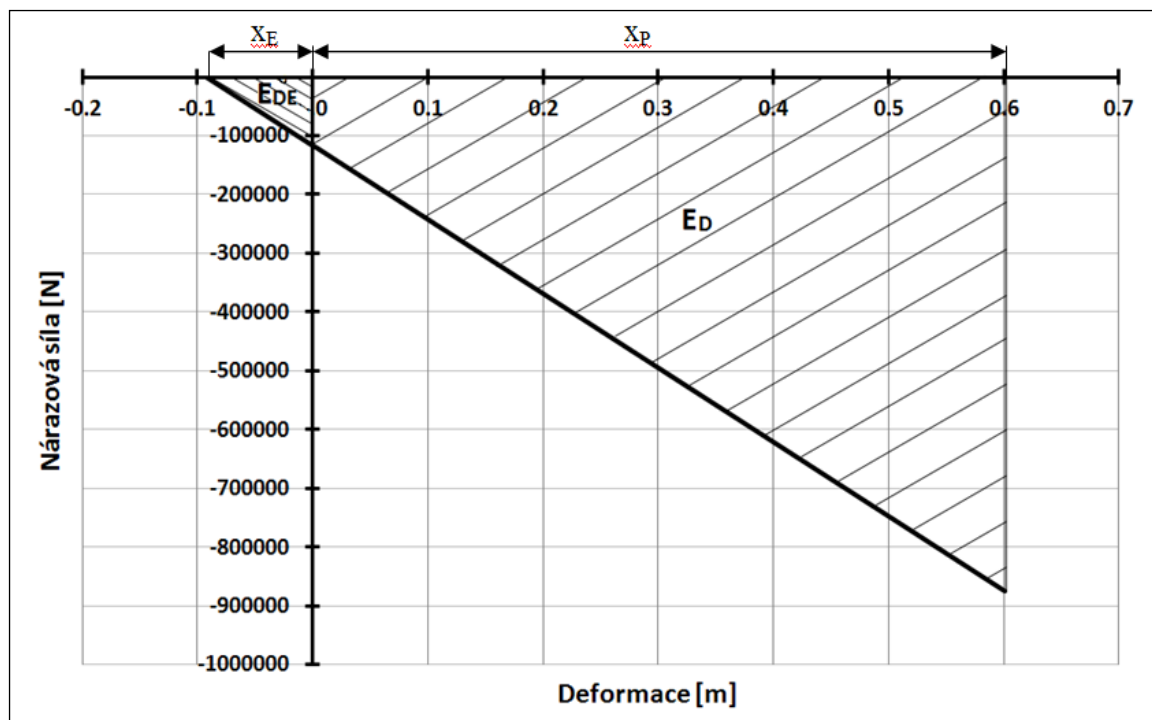
Obr. 12 – Závislost EES na deformaci vozidla Audi A4
Obr. 12 – Dependence of EES on deformation of vehicle Audi A4

6 POROVNÁNÍ VÝPOČTU EES DLE REÁLNÉ A LINEÁRNÍ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY

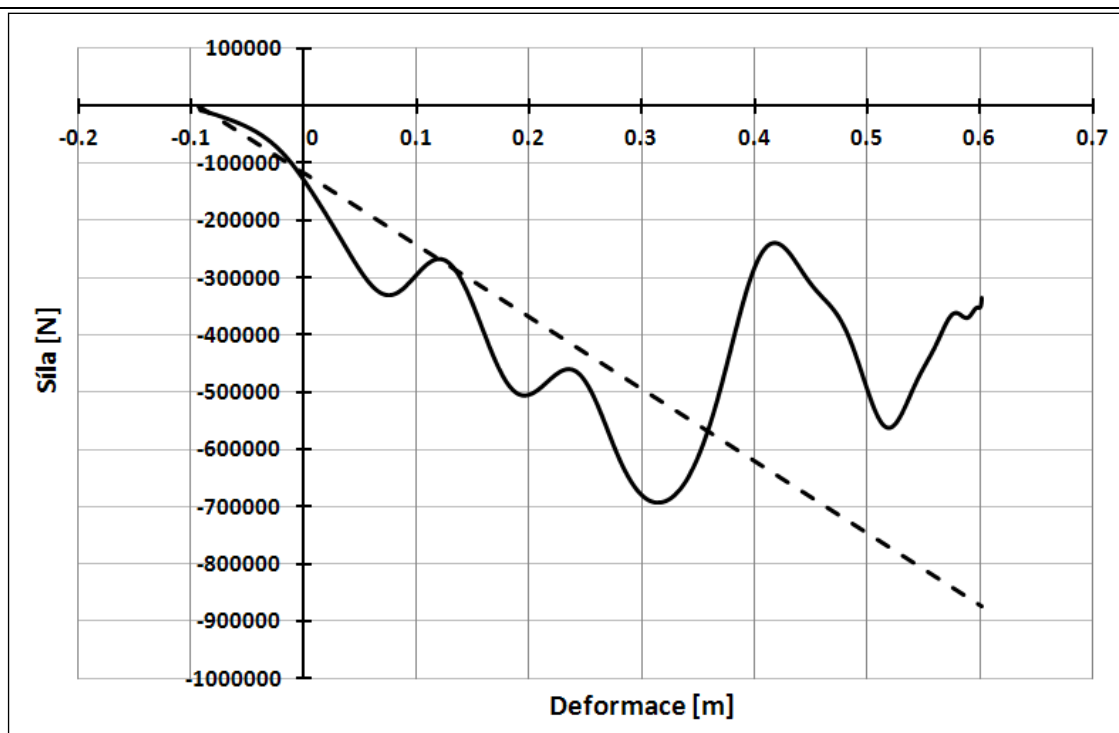
Porovnán je výpočet EES založený na reálné deformační charakteristice přední části vozidla a výpočet EES založený na zjednodušené lineární deformační charakteristice. Lineární deformační charakteristika přední části vozidla je charakterizována jedním koeficientem tuhosti k , jehož výpočet je dán vzorcem 9. Pro vozidlo Audi A4 modelový rok 2011 je, dle zdroje [10], koeficient tuhosti $k = 1261600$ N/m. Porovnání skutečné deformační charakteristiky přední části předmětného vozidla (plná čára) a lineární deformační charakteristiky (přerušovaná čára) je znázorněno na obr. 14. Porovnání výpočtu EES dle reálné deformační charakteristiky (plná čára) a dle lineární deformační charakteristiky (přerušovaná čára), je znázorněno na obr. 15. Na obr. 16 je znázorněna procentuální odchylka mezi výpočtem EES z lineární deformační charakteristiky a výpočtem EES z reálné deformační charakteristiky přední části předmětného vozidla.

$$k = \frac{\bar{F}}{x_p} \quad [\text{N/m}] \quad (9)$$

Kde: F [N] nárazová síla vozidla,
 x_p [m] plastická (trvalá) deformace přední části vozidla.

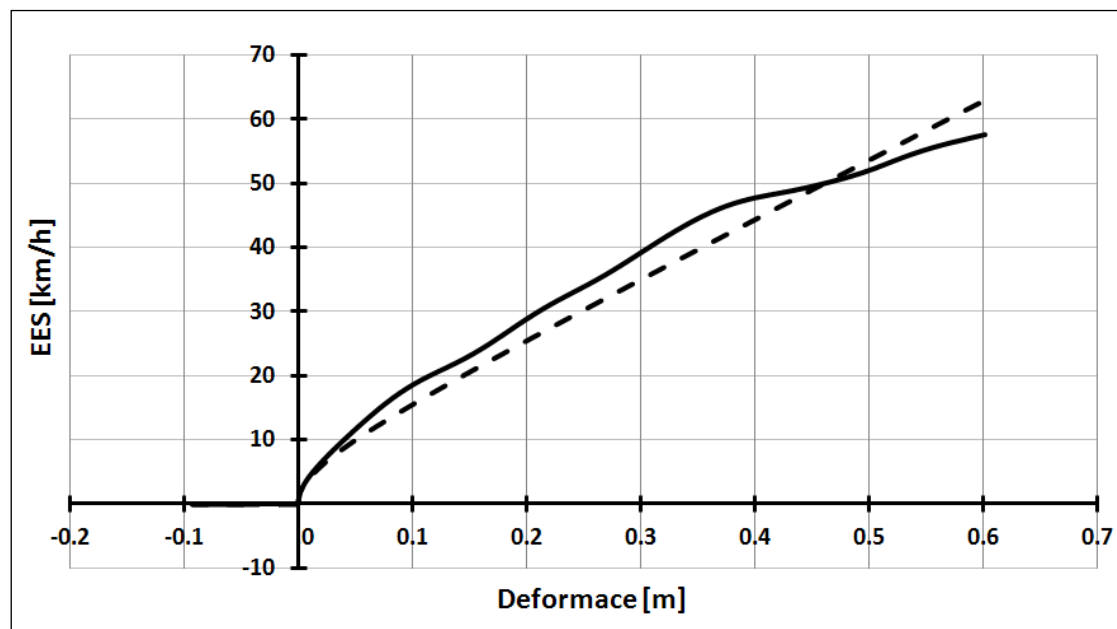


Obr. 13 – Lineární deformační charakteristika přední části vozidla Audi A4
 Fig. 13 – Linear deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4



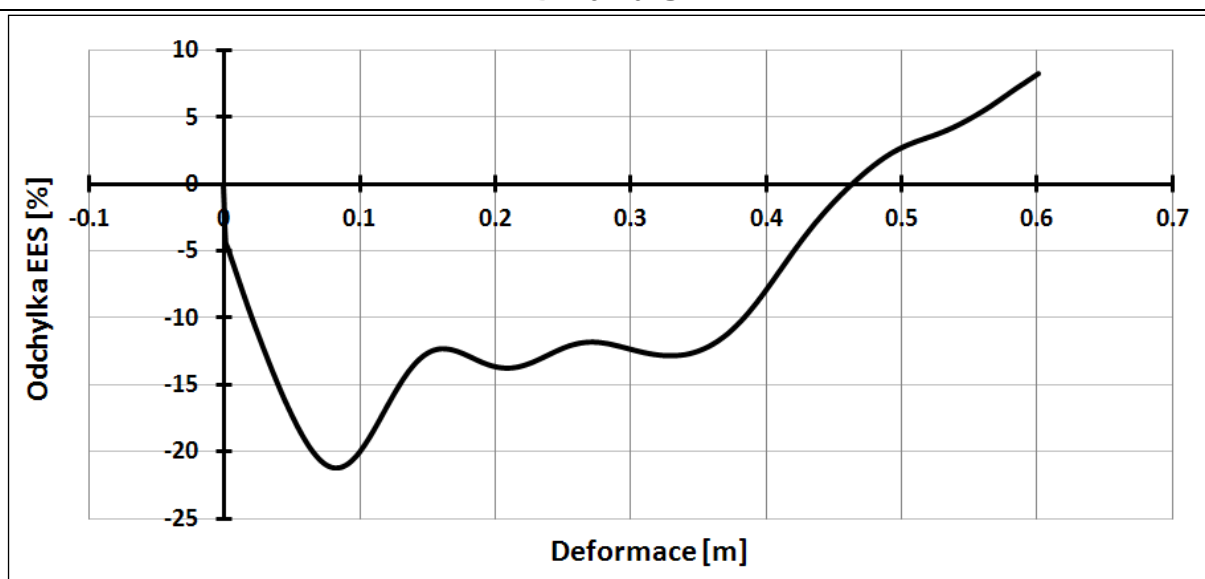
Obr. 14 – Porovnání reálné a lineární deformační charakteristiky přední části vozidla Audi A4

Fig. 14 – Comparison of real and linear deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4



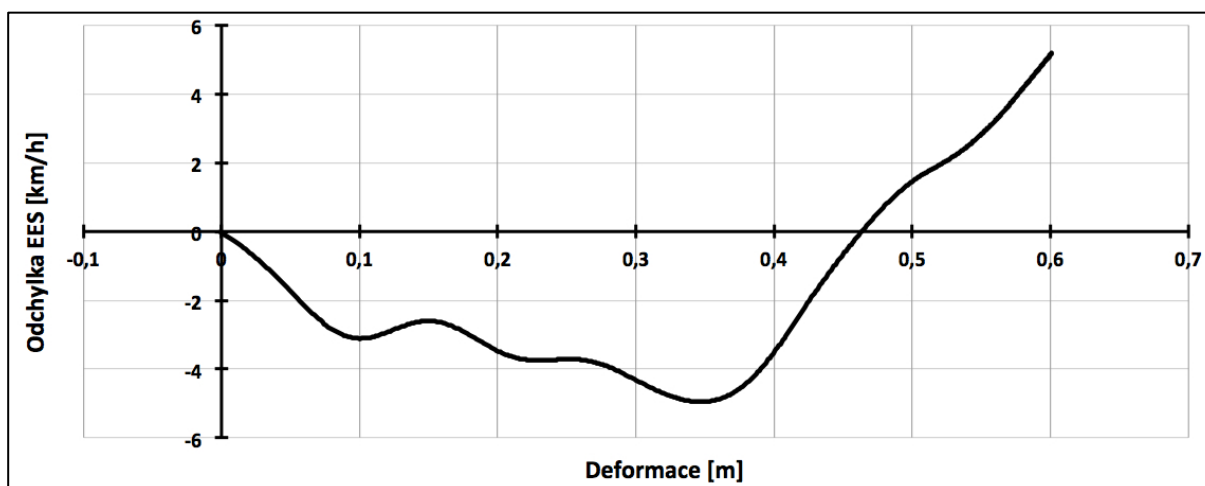
Obr. 15 – Porovnání výpočtu EES dle reálné a lineární deformační charakteristiky přední části vozidla Audi A4

Fig. 15 – Comparison computation of EES according to real and linear deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4



Obr. 16 – Procentuální odchylka EES lineární deformační charakteristiky od reálné deformační charakteristiky přední části vozidla Audi A4

Fig. 16 – Percentage deviation of EES of linear deformation characteristic from real deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4



Obr. 17 – Odchylka EES lineární deformační charakteristiky od reálné deformační charakteristiky přední části vozidla Audi A4

Fig. 17 – Deviation of EES of linear deformation characteristic from real deformation characteristic of front part of the vehicle Audi A4

7 ZÁVĚR

V článku je nastíněn způsobem, jakým lze stanovit výpočet EES s využitím dat z reálných nárazových zkoušek. Ukázáno je vyhodnocení dat z čelní nárazové zkoušky vozidla Audi A4. Za účelem získání deformační charakteristiky přední části vozidla jsou zpracovány a vyhodnoceny záznamy z akcelerometru umístěném ve vozidle a snímačů síly umístěných v tuhé bariéře. Pro výpočet EES předmětného vozidla je vytvořen výpočetní program, jehož vstupním parametrem je hodnota průměrné deformace přední části vozidla.

Následně je provedeno porovnání reálné a lineární deformační charakteristiky, kterou využívá ve svých výpočtech EES např. program Crash 3. Porovnán je také samotný výpočet EES dle reálné a lineární deformační charakteristiky přední části předmětného vozidla, viz obr. 15. Z obr. 16 je zřejmé, jaká procentuální odchylka vypočítané EES v závislosti na velikosti vzniklé deformace je u výpočtu EES s využitím lineární deformační charakteristiky na rozdíl od reálné deformační charakteristiky. Maximální hodnota této odchylky dosahuje 21,2 %. Na obr. 17 je tato odchylka znázorněna v jednotkách EES které jsou běžně užívané ve znalecké praxi, tedy v km/h. Maximální odchylka je v tomto případě přibližně 5 km/h.

8 LITERATURA

- [1] **Bradáč, Albert.** *Soudní inženýrství*. Brno : CERM s.r.o., 1999. ISBN 80-7204-133-9.
- [2] **Burg, Heinz.** *Handbuch der Verkehrsunfall Rekonstruktion*. Wiesbaden, 2007. ISBN 3-8348-0172-0.
- [3] **Burg, H. a Rau, H.** *Handbuch der Verkehrsunfall Rekonstruktion*. Kippenheim, 1981. ISBN 3-88550-020-5.
- [4] **Cichos, D.** Crash Analysis Criteria Description. [Online] 2006. [Citace: 21. 3 2012.] www.crash-network.com.
- [5] **Harmati, I. a Várlaki, P.** Identification of Energy Distribution for Crash. Hungary, 2007.
- [6] **Kasanický, G.** *Teória pohybu a rázu pri analýze a simulácii nehodového děja*. Žilina : EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-597-5.
- [7] **Lenard, J., Hurley, B. a Thomas, P.** *The Accuracy of Crash3 for Calculating Collision Severity in Modern European Cars*. United Kingdom : Vehicle Safety Research Centre, 1998. 98-S6-O-08.
- [8] **McHenry, B. G.** The algorithmus of Crash 3. *McHenry Software*. [Online] 2001. [Citace: 1. 3 2012.] www.mchenrysoftware.com.
- [9] **Melegh, G.** *AutoExpert - CD EES 4.0*. [Katalog] Hungary, 2005.
- [10] **NCAP.** Report number NCAP-KAR-11-015. *New car assesment program*. [Online] 2011. [Citace: 11. 12 2011.] www-nrd.nhtsa.dot.gov.