

Slavomír Kardoš

Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Možnosti využitia low-g akcelerometrickej MEMS jednotky pre snímanie viskozity technických olejov

**Abstrakt.** Viskozita pracovných kvapalín je jedným zo základných parametrov charakterizujúcich ich fyzikálne vlastnosti a má zásadný vplyv na funkcionality systémov, v ktorých sú použité ako pracovné médiá. V príspevku je opísaná metodika merania odozvy akcelerometrickej MEMS jednotky na namáhanie pracovnej kvapaliny šmykovým napätím, na základe ktorého je možné odvodiť viskozitné vlastnosti.

**Kľúčové slová:** viskozita kvapalín, meranie viskozity, elektroizolačné a lubrikačné oleje, MEMS akcelerometer.

**Abstract.** The viscosity of a working liquid is one of the most important parameters, which characterize its physical properties and has strong influence to the functionality of the system, where it is used as a working media. In the article, the methodology of accelerometric MEMS response measurement is described, where the shear stress was applied to a working liquid. Based on the signal response the viscosity correlation can be derived.

**Keywords:** viscosity of fluids, viscosity measurement, electroinsulation and lubrication oils, MEMS accelerometer.

### Úvod

Pracovné kvapaliny v operačnom rozsahu teplôt a vplyvom rôznych vonkajších činiteľov menia svoje fyzikálne vlastnosti, preto ich znalosť je nevyhnutná pre chod systému, v ktorom sú použité ako elektroizolačné, lubrikačné a iné médiá. Priebeh viskozity kvapalín v teplotnej oblasti vzhľadom na meniacu sa vnútornú energiu a interakcie na molekulárnej úrovni môže v pracovnom rozsahu teplôt nadobúdať aj niekoľkorádovej zmeny, čo má priamy vplyv na ich mechanické vlastnosti. Širokovyužívanou skupinou kvapalínových pracovných médií sú minerálne, syntetické, resp. polosyntetické organické oleje. Závislosť viskozity týchto kvapalín od ich teploty má hyperbolický charakter, pričom v okrajových oblastiach môže nadobúdať kritických hodnôt vzhľadom na dopad na funkcionality systému. Pri ich využití ako lubrikačného média je pri nízkych teplotách potrebná vyššia hodnota mechanickej práce pre mazanie pohyblivých súčastí a pri vyšších teplotách môže dôjsť k podstatnému až kritickému zníženiu ich lubrikačnej schopnosti.

### Viskozita kvapalín

Viskozita predstavuje mieru odporu, resp. vnútorného trenia voči deformácii alebo toku kvapaliny, ktorá je deformovaná vplyvom šmykového napätia alebo napätia v ťahu. Viskozita kvapaliny sa s narastajúcou teplotou znižuje. U lubrikačných médií to má výraznú hyperbolickú závislosť. [1][2]

Dynamická (šmyková) viskozita kvapaliny vyjadruje jej odpor voči laminárnemu prúdeniu, kde sa jednotlivé susedné vrstvy pohybujú paralelne odlišnými rýchlosťami. Pre laminárne prúdenie formuloval Isaac Newton zákon, podľa ktorého je tangenciálne napätie úmerné dynamickej viskozite a gradientu rýchlosti. U newtonovských kvapalín pre udržanie konštantnej rýchlosti pohybujúceho sa telesa s daným kontaktným povrchom voči referenčnému telesu je potrebná sila [3][4][5]

$$(1) \quad F = \tau \cdot S = \eta \cdot \frac{v}{h} \cdot S \text{ [N]},$$

pričom šmykové napätie

$$(2) \quad \tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta j \text{ [N/m}^2\text{]},$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita [Pa.s] a  $j = \frac{dv}{dy}$  je gradient rýchlosti [s<sup>-1</sup>].

Z praktického hľadiska bola zavedená kinematická viskozita definovaná výrazom [3][6]

$$(3) \quad \nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s}^2\text{]},$$

kde  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota kvapaliny.

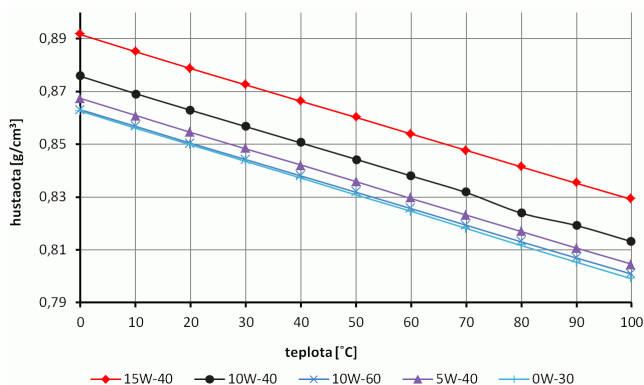
Hustota kvapaliny je daná hmotnosťou látky pripadajúcou na jednotku objemu, t.j.  $\rho = m/V$  [kg/m<sup>3</sup>] a súvisí s atómovou hmotnosťou a molekulárnymi väzbami. Na hustotu má vplyv teplota, tlak a povrchové napätie. Pre zjednodušenie porovnávania hustoty medzi systémami s rôznymi jednotkami je zavedená bezrozmerná relatívna hustota (specific gravity) vzťahnutá k referenčnému materiálu, zvyčajne vode. [7][8]

### Viskozita technických olejov

Elektroizolačné a lubrikačné oleje obsahujú dve hlavné zložky - základový olej a aditíva. Základový olej predstavuje ropný základ, syntetické materiály alebo ich kombináciu, aditíva obsiahnuté v oleji poskytujú ochranu proti opotrebeniu, korózii, neutralizujú kyseliny, podporujú stabilitu viskozity, majú dispergačné a detegentné účinky, napomáhajú teda pracovným olejom splňať vysoké nároky na prevádzku zariadení v špecifikovaných pracovných podmienkach. [8][9][10]

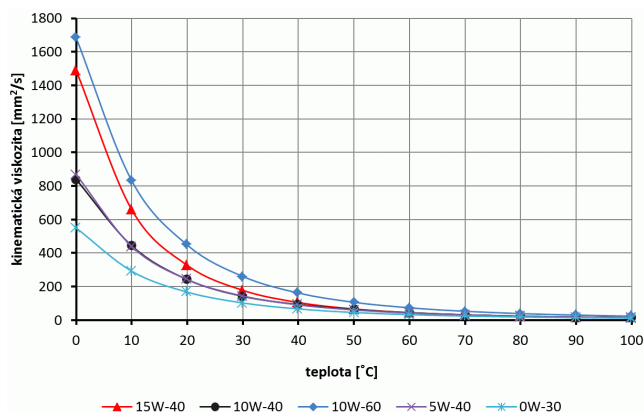
Kinematická viskozita ako aj hustota pracovného oleja sú teplotne závislé charakteristiky. U motorových olejov sú tieto charakteristiky určené triedou viskozity SAE (Society of Automotive Engineers). Hustota má charakter klesajúcej lineárnej závislosti (Obr. 1). Výrobcovia motorových olejov udávajú referenčnú hodnotu hustoty pri teplote 15°C v kg/l alebo g/cm<sup>3</sup>. Kinematická viskozita je určená štandardom ASTM D445 a je udávaná v jednotkách mm<sup>2</sup>/s alebo cSt. Na báze štandardu SAE sú definované závislosti hustoty a kinematickej viskozity najpoužívanejších multitried motorových olejov v teplotnom rozsahu 0-100°C, na základe ktorých je vyjadrená korelácia kinematickej viskozity a hustoty (Obr. 1, 2).

Hustota týchto médií má lineárnu závislosť, preto smernicu hustoty ľubovoľného komerčného motorového oleja splňajúceho štandard SAE je možné určiť na základe referenčných údajov výrobcu. [11-16]



Obr.1. Teplotné závislosti hustoty vybraných multitried motorových olejov podľa štandardu SAE (ASTM D7042) (SVM3000 Stabinger Viscometer, Anton Paar GmbH) [15]

Teplotná závislosť kinematickej viskozity motorového oleja predstavuje klesajúcu hyperbolickú závislosť (Obr. 2), kde pri teplotách pod 0°C je zmena kinematickej viskozity najvýraznejšia. Pri teplotách vyšších ako 50°C sa kinematická viskozita pre všetky triedy blíži k hodnote 10 mm<sup>2</sup>/s. Výrobcom komerčných motorových olejov štandardne uvádzajú jej hodnoty pre teploty 40 a 100°C.



Obr.2. Teplotné závislosti kinematickej viskozity vybraných multitried motorových olejov podľa štandardu SAE (ASTM D7042) (SVM3000 Stabinger Viscometer, Anton Paar GmbH) [15]

### Metódy merania viskozity kvapalinových médií

Pre meranie viskozity kvapalín je využívaných viacero meracích metód rôzneho princípu a dosiahnuteľnej presnosti merania, pričom konkrétna metóda je volená v závislosti od požiadaviek aplikácie a technologickej dostupnosti:

- kapilárne a výtokové viskozimetre, využívajúce laminárne prúdenie v kruhovej trubičke – kapiláre,
- guľôčkové viskozimetre, využívajúce laminárne obtekanie guľôčky,
- rotačné viskozimetre, v zostave dvoch súosových valcov, jedného statického a druhého rotujúceho,
- vibračné viskozimetre, využívajúce tlmiacich schopností kvapaliny, priamo súvisiacich s jej viskozitou.

Viskozita newtonovských kvapalín je látkový parameter závislý na tlaku a teplote a na rozdiel od nenevtonovských kvapalín je možné aplikovať všetky uvedené metódy.

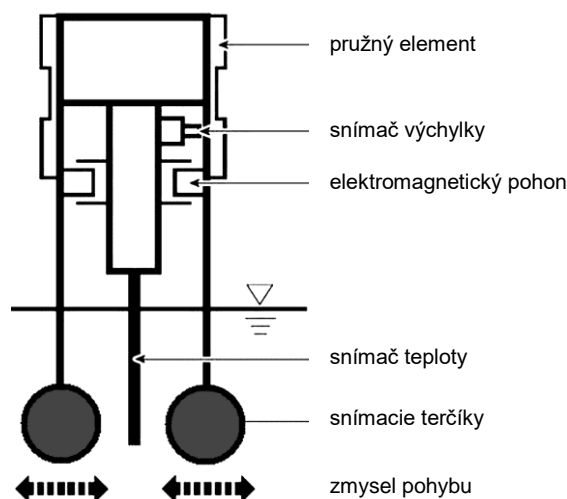
V technickej praxi je často požadovaná periodická diagnostika pracovných kvapalín vrátane viskozitných vlastností, pretože sú premenlivé i v čase vplyvom degradačných procesov ako oxidácia, chemické zmeny podmienené tepelnými procesmi, korózia, mechanická dekompozícia a kontaminácia.

### Experimentálna zostava

Predmetom príspevku je experimentálne overenie možnosti použitia citlivej low-g akcelerometrickej MEMS jednotky pre meranie útlmu nútených kmitov v pracovnej kvapaline pomocou vibračného viskozimetra.

Vibračný viskozimeter využíva pre aplikáciu šmykového napätia vhodné teliesko, vykonávajúce torzný alebo priečny pohyb. Snímanie je realizované meraním výkonu potrebného pre oscilácie s konštantnou amplitúdou a frekvenciou, meraním útlmu nenúteného kmitania alebo meraním rezonančnej frekvencie. Súčiniteľ tmenia je pri laminárnom prúde lineárnou funkciou kinematickej viskozity, t.j.  $b = k \cdot \nu$ .

Usporiadanie na Obr. 3 je založené na meraní útlmu dvoch kmitajúcich tenkých kovových terčiek a pri vhodnej konštrukcii umožňuje presné meranie viskozity v širokom rozsahu hodnôt. Viskozita je spravidla meraná nepriamo na základe merania veľkosti budiaceho sínusového prúdu potrebného na budenie kmitavého pohybu sústavy terčiek pri frekvencii typicky 30 Hz a amplitúde mechanických kmitov do 1 mm. [3] Pred samotným meraním je prístroj kalibrovaný pomocou kvapaliny známej viskozity. Súčasne automatizované zostavy umožňujú automatizované meranie viskozity v definovanej teplotnej oblasti použitím prietokového termostatu a radiaceho softvéru pre riadenie teplotného spádu, samotné meranie, zber a spracovanie nameraných dát.



Obr.3. Princípová zostava vibračného viskozimetra v priečnom usporiadaní [23]

Pre experimentálnu zostavu bolo vytvorených niekoľko konfigurácií, lineárneho i priečného usporiadania, pričom najproblematickejším prvkom bol systém generátora nútených kmitov. Uspokojivá signálová odozva bola dosiahnutá usporiadaním na Obr. 4.

Snímacia jednotka je tvorená 3-osovým analógovým akcelerometrom ADXL335 (Obr. 5) s nasledovnými charakteristickými parametrami:

- rozsah snímania akcelerácie:  $\pm 3$  g (low-g),
- napájanie 1,8 – 3,6 V,
- spotreba: 350  $\mu$ A (typ.),
- šírka pásma 0,5 – 1600 Hz, externe nastavená na 100 Hz.

Jednotka budenia je založená na elektromagnetickom systéme typu „voice-coil“:

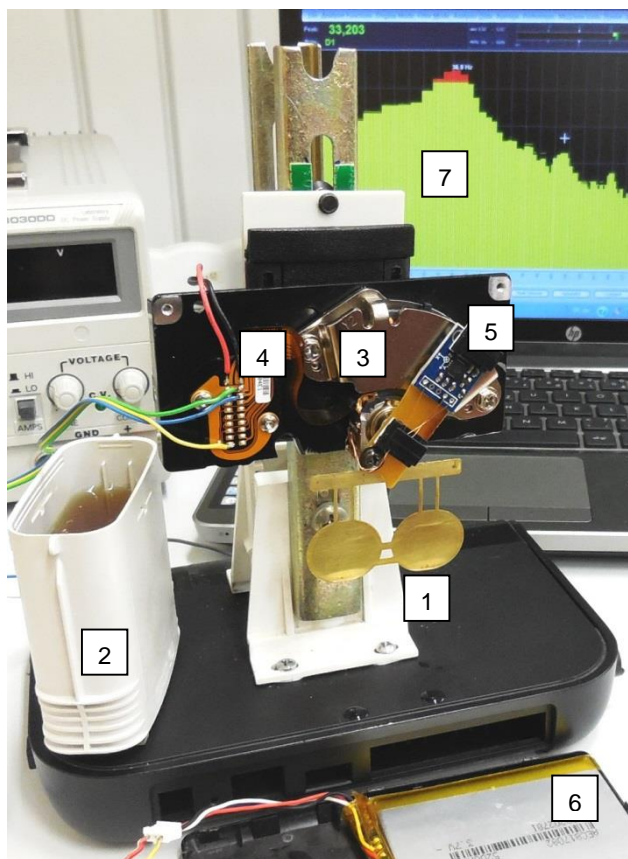
- jednocievkový systém so vzduchovým jadrom,
- precízne výkyvné ramienko s ložiskovým uložením,
- antiparalelne uložená dvojica neodýmiových magnetov,
- uhlová výchylka  $\approx 30^\circ$ , nastavená na uhlovú dráhu  $< 1$  mm,

- prepojenie elektromagnetického systému, napájania a výstupu akcelerometrickej jednotky plochým pružným polyimidovým páskom s medenými vodičmi.

Budenie kmitavého pohybu vychýľovacieho systému je riadené signálom funkčného generátora METEX MXG-9810A, sínusovým signálom o frekvencii 36 Hz.

Signál akcelerometrickej jednotky bol v reálnom čase spracovávaný spektrálnym analyzátorom Spectrum analyzer pro Lab s nasledujúcimi nastavenými parametrami:

- šírka analyzovaného pásma 0 – 1000 Hz,
- mód filtra – Hanning,
- meranie amplitúdy s aplikovaným filtrom 36 Hz.

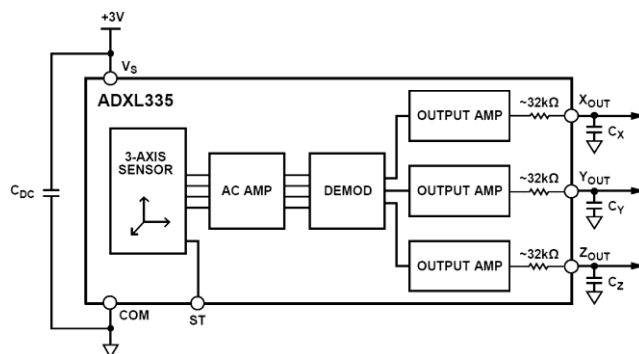


Obr.4. Experimentálna zostava pre meranie odozvy akcelerometrickej jednotky na útlm núteného kmitavého pohybu v pracovnej kvapaline

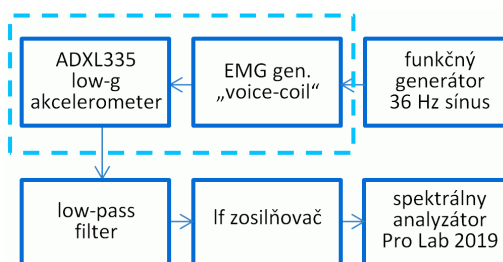
Legenda ku obrázku č. 4:

- 1 – dvojica 200  $\mu\text{m}$  mosadzných terčiek na spoločnom ramienku,
- 2 – pracovná polypropylénová nádobka s objemom 100 ml,
- 3 – elektromagnetický vychýľovací systém s budenou cievkou pripojenou prostredníctvom pružného fóliového káblíka,
- 4 – konektor s vyústením fóliového káblíka na základovej doske,
- 5 – modul akcelerometrickej meracej jednotky ADXL335 umiestnený na výkyvnom ramienku,
- 6 – 3,6 V Li-Ion akumulátor napájania akcelerometrickej jednotky,
- 7 – okno spektrálneho analyzátoru Spectrum analyzer pro Lab.

Bloková schéma meracieho systému je zobrazená na obrázku č. 6 s uvedením základných stavebných prvkov.



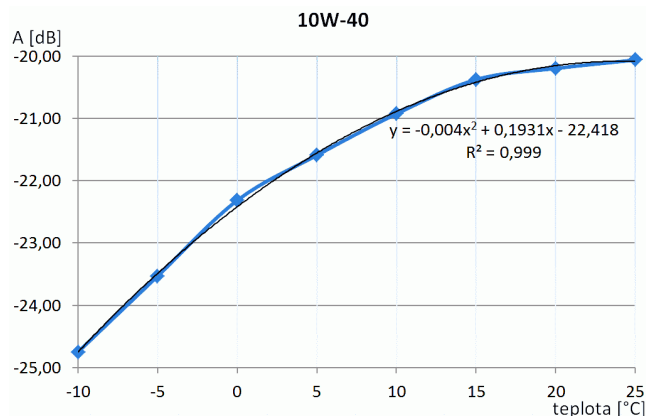
Obr.5. Bloková schéma 3-osového analógového akcelerometra ADXL335 s externe nastaviteľnou šírkou pásma [18]



Obr.6. Bloková schéma meracieho systému, prerušovanou čiарou prvky na spoločnom výkyvnom ramienku podliehajúce pracovnej frekvencii generátora sínusového signálu

### Diskusia experimentálnych výsledkov

Merací systém bol udržiavaný na izbovej teplote a pri nastavenej pracovnej frekvencii 36 Hz a rozkmit pracovných terčiek < 1 mm bez pracovného média bola odmeraná teplotná závislosť signálovej odozvy akcelerometra na útlm núteného kmitavého pohybu terčiek v pracovnej kvapaline v teplotnej oblasti -10 až +25°C (Obr. 7). Použitým pracovným médium bol multitriedový komerčný motorový olej Pamasoil 10W-40 podliehajúci špecifikácii ACEA.



Obr.7. Graf závislosti signálovej odozvy akcelerometra ADXL335 od teploty pracovného média s uvedením aproximačnej polynomickej funkcie

Spektrum signálovej odozvy akcelerometra obsahuje okrem dominantnej zložky budiaceho signálu aj množstvo rušivých zložiek pochádzajúcich v rôznom rozsahu od interferencií mechanických súčastí, elektromagnetického rušenia a okolitých vibrácií. Porovnaním signálovej odozvy bez pracovného média, t.j. vo vzduchovej atmosfére, s odozvou s pracovným médium, v obidvoch prípadoch pri izbovej teplote, je možné konštatovať odstup približne 4 dB. Meraním na vzorke pracovnej kvapaliny v uvedenom

rozsahu pracovných teplôt bol zaznamenaný odstup približne 5 dB, s tvarom charakteristiky aproximovateľným na polynomicnú rovnicu 2. rádu s koeficientom spoľahlivosti až 0,999. Charakteristika v absolútnych hodnotách predstavuje hyperbolickú funkciu obdobnú s charakterom teplotnej závislosti kinematickej viskozity tohto typu média na teplote, čoho predpoklad bol aj cieľom tejto štúdie.

### Záver

V príspevku bola analyzovaná možnosť merania viskozity špecifického typu kvapalín, ktorými sú minerálne oleje, použitím citlivej akcelerometrickej MEMS jednotky ADXL335. Experimentálna zostava bola založená na princípe vibračného viskozimetra v priečnom usporiadaní s kmitajúcimi kruhovými terčikmi a elektromagnetickým vychýľovacím systémom. Na základe útlmu núteného kmitavého pohybu v pracovnej kvapaline bola predpokladaná jeho korelácia s amplitúdou kmitavého pohybu na frekvencii 36 Hz v teplotnej oblasti. Porovnaním získanej charakteristiky so špecifikáciou zvolenej pracovnej kvapaliny, polosyntetickým motorovým olejom s definíciou viskozitnej triedy 10W-40, je možné podľa tvaru charakteristiky konštatovať súvis medzi kinematickou viskozitou a útlmom v newtonovskom type kvapaliny, pričom presnosť a citlivosť merania je možné ovplyvniť mechanickou zostavou, použitým snímacím prvkom, kalibráciou a kompenzáciou vonkajších vplyvov. Ďalšia práca bude zameraná na precíznejšie usporiadanie mechanickej zostavy, teplotnú kompenzáciu a filtráciu spektra signálu v pracovnej oblasti snímania.

### Literatúra

- [1] FOWLER M., Viscosity 2007. Online: <<http://galileo.phys.virginia.edu/classes/152.mf1i.spring02/Viscosity.htm>>
- [2] Kolektív autorov: Neutrium, Viscosity, 2012. Online: <[https://neutrium.net/fluid\\_flow/viscosity/](https://neutrium.net/fluid_flow/viscosity/)>
- [3] JANALÍK, J.: Viskozita tekutin a její měření, VŠB-TU Ostrava, 2010
- [4] TABOR D., Gases, Liquids and Solids: and Other States of Matter (Cambridge Press, 1991). ISBN 978-05-2140-667-3
- [5] VANWAZER J.R., Viscosity and Flow Measurement (Interscience, 1963)
- [6] Kolektív autorov: Kittiwake, Viscosity: A lubricant's most important characteristic. Online: <[http://www.kittiwake.com/sites/default/files/2%20-%20Viscosity%20Dec12\\_0.pdf](http://www.kittiwake.com/sites/default/files/2%20-%20Viscosity%20Dec12_0.pdf)>
- [7] ELERT G.: The Physics Hypertextbook, 2014. Online: <<http://physics.info>>
- [8] MANN D.: Motor Oils and Engine Lubrication, 2008. Online: <<http://www.motor-oil-engineers.com/>>
- [9] CALRK Ryan James, M.S.E.: On-Board Monitoring of Engine Oil, Western Michigan University, 2011. Online: <[www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA538688](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA538688)>
- [10] VAFANEJADA.: MEMS in Automotive: Oil Quality Sensor, 2009. Online: <<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A1ed3ab0b-c131-45a1-8f85-26ec8f5eb24f/>>
- [11] Kolektív autorov: Machinery Lubrication, Oil Viscosity. Online: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/411/oil-viscosity>>
- [12] WILLIAMSON M., KEW Engineering, Automotive Fluids Online: <[http://www.kewengineering.co.uk/Auto\\_oils/oil\\_viscosity\\_explained.htm](http://www.kewengineering.co.uk/Auto_oils/oil_viscosity_explained.htm)>
- [13] RANOWSKY Amanda, CSC Scientific Company, Inc. 2015. Online: <<http://www.cscscientific.com/csc-scientific-blog/whats-the-difference-between-dynamic-and-kinematic-viscosity>>
- [14] D2270-04, 2004, Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40°C and 100°C, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004. Online: <<http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2270-04.htm>>

- [15] Viscopedia, Anton Paar GmbH. Online: <<http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/engine-oil/>>
- [16] Anton Paar GmbH, SVM 3001 Stabinger Viscometer datasheet
- [17] GLADIŠOVÁ, MIHALÍK, Spojité signály. ISBN: 978-80-553-1936-0
- [18] Analog Devices, ADXL335, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>

### Podakovanie



Publikácia bola vypracovaná s podporou projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií" v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055, spolufinancovaného zo Štrukturálnych fondov EU ERDF v rámci Operačného programu Výskum a vývoj - 2009/2.1/03-SORO

*Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku. Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ..*

**Autor:** Slavomír Kardoš, Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [slavomir.kardos@tuke.sk](mailto:slavomir.kardos@tuke.sk)