

# Stanovení podílu ethanolu v biopalivu na základě měření elektrických vlastností směsi

DETERMINATION OF ETHANOL CONCENTRATION IN BIOFUEL BY ELECTRICAL PROPERTIES MEASUREMENT

Marek Žák, Vít Marek – Mendelova univerzita v Brně, Ústav techniky a automobilové dopravy

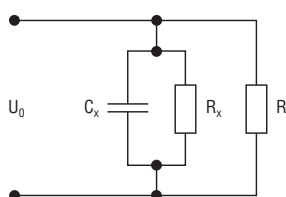
Biopaliva mají potenciál rychlého rozšíření (jsou-li produkována efektivně a ekologicky udržitelně) vzhledem ke své kompatibilitě se stávajícími konstrukcemi spalovacích motorů (1). Například při použití ethanolu, jakožto alternativního biopaliva k benzínu, ve směsi s benzinem obsahující do 30 % objemu ethanolu není potřeba žádných zásahů do stávajícího řízení spalovacího motoru (2). Pro směsi s koncentrací lihu od 30–90 % vystačí úprava řídicích algoritmů a vyšší dimenzování průtoku vstříkovačích ventilů. Jednotlivá paliva vyžadují odlišné nastavení parametrů řízení spalovacího procesu zážehového motoru, pokud má být plně využito schopností paliva a dosaženo optimálních výkonových a emisních hodnot (3). Řídicí parametry je třeba měnit s ohledem na aktuální koncentraci ethanolu obsaženého ve směsi paliva. Například nižší tlak par ethanolu než par benzínu a větší výparné teplo ethanolu způsobují potíže se startováním za nižších teplot (4).

Cílem tohoto článku je uvést návrh metody pro určení koncentrace ethanolu ve směsi paliva před vstupem do spalovacího prostoru motoru, a to na základě určení elektrických vlastností směsného paliva.

## Materiál a metoda

Přímá metoda určení obsahu ethanolu ve směsi s benzinem na základě elektrických vlastností vychází z rozdílné elektrické vodivosti a relativní permitivity benzínu a ethanolu (5). Tato metoda byla původně vyvinuta pro zjišťování obsahu vody v lihových směsích. Měření se provádí pomocí sondy, která je ponořena ve směsi paliva a konstrukčně odpovídá kondenzátoru, jehož dielektrikem je právě palivová směs. Jelikož dielektrikum kondenzátoru není nikdy dokonalým izolantem, je přesné vyjádření sondy – paralelní RC článek. Pro zjednodušenou představu měřících metod založených na měření elektrických vlastností představuje benzin pro svou minimální vodivost a relativní permitivitu netečnou složku paliva. Roste-li vodivost i relativní permitivita paliva, roste koncentrace ethanolu v palivu.

Obr. 1. Paralelní RC článek s přidávným vybíjecím odporem R



Pokud by rostla výrazně vodivost oproti nárůstu relativní permitivity, pak by se dalo předpokládat, že palivo je kontaminováno vodou.

Podle použitého způsobu napájení (stejnoseměrné, střídavé) tohoto RC článku a měřených charakteristik (deformace napájecího signálu, doba vybití) je možno rozlišit více metod vedoucích k určení palivové směsi (5).

Vybíjecí charakteristika je metoda využívající stejnosměrné napájení sondy (RC článku), měří se jako pokles napětí v čase a má exponenciální charakter. Přivedením napětí na svorky článku se ten nabíjí a napětí na svorkách roste. Po dosažení určité hodnoty napětí se napájení odpojí, RC článek se začne samovolně vybíjet a měří se doba, za jakou napětí klesne na požadovanou hodnotu. Tento pokles napětí v čase se dá vyjádřit časovou konstantou obvodu  $\tau$ , kdy:

$$\tau = R_x \cdot C_x \quad (1)$$

kde  $\tau$  je časová konstanta obvodu (s),  
 $R_x$  je odpor měřeného obvodu ( $\Omega$ ),  
 $C_x$  je kapacita měřeného obvodu (F).

Pokud měření zopakujeme s tím, že vybíjíme článek ještě přes přidávný známý odpor R (obr. 1.), získáme soustavu rovnic, z nichž je možné určit  $R_x$  a  $C_x$  RC článku:

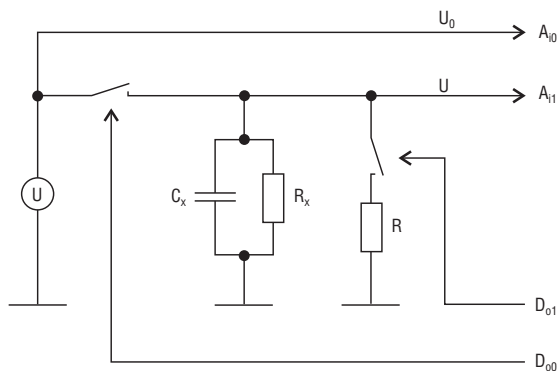
$$\tau_1 = C_x \cdot R_x \quad (2)$$

$$\tau_2 = C_x \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R}} \quad (3)$$

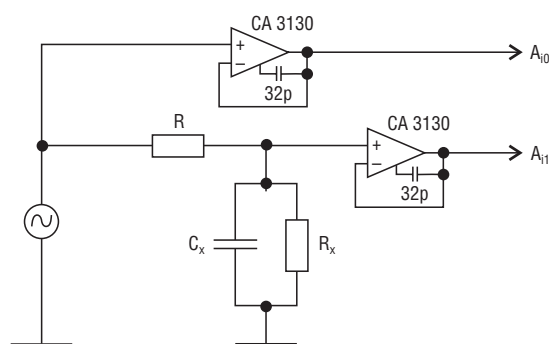
kde  $\tau_1, \tau_2$  jsou naměřené časové konstanty (s),  
 $R$  je přidávný vybíjecí odpor ( $\Omega$ ).

Druhou metodou pro zjištění směsi paliva pomocí elektrických vlastností je konduktometrie. Tato metoda je založena na napájení sondy signálem střídavého napětí a následné analýze fázového posunu a amplitudy transformovaného výstupního signálu vůči vstupnímu. Teorie vychází z RLC obvodů, kdy v případě RC článku napájeného střídavým napětím způsobuje periodické nabíjení a vybíjení kondenzátoru předbíhání proudu vůči napětí. Jelikož se jedná o paralelní obvod, je proud protékající kondenzátorem a rezistorem stejný. Mění se však napětí na jednotlivých součástkách. Napětí na odporu odpovídá jeho rezistenci, napětí na kondenzátoru jeho kapacitanci (zdánlivý odpor kondenzátoru). Jak bylo zmíněno výše, u kondenzátoru dochází ještě k fázovému posunu napětí vůči proudu, takže

Obr. 2. Zapojení neizolované sondy se stejnosměrným napájením



Obr. 3. Zapojení neizolované sondy se střídavým napájením



výsledný napěťový signál procházející tímto obvodem je modulován amplitudově i fázově (6).

Stejně jako u vybíjecí charakteristiky lze tuto změnu signálu matematicky popsat jako přenosovou funkci obvodu.

Práce je zaměřena na použití v reálných podmínkách, proto nebyla pro měření použita referenční paliva, ale palivové směsi pocházely z běžné distribuční sítě a informace o jejich chemickém složení (přidaných aditivách) jsou minimální. Při určení paliv se vycházelo z norem a kusých informací výrobců o koncentraci biosložek v daném palivu.

Vzorky pro měření elektrických vlastností byly namíchány z komerčních paliv Natural 95 a „E85“. Při míchání se vycházelo z předpokladu obsahu biosložky v Naturalu 5 % a koncentraci ethanolu v palivu „E85“ 85 %. Palivové směsi byly voleny s ohledem na změnu vsřikované dávky paliva mezi sousedními koncentracemi (rozsah regulace  $\lambda$ -sondy při řízení spalovacího motoru). Prvotním cílem bylo dosáhnout spolehlivého rozlišení daných koncentrací ethanolu v palivové směsi.

Transformace signálu byla vyhodnocována v komplexní rovině. Byla vytvořena databáze komplexních čísel odpovídajících etalonovým koncentracím popsaným výše. Pro každou etalonovou koncentraci bylo vytvořeno pole komplexních čísel, odpovídající různým budičím frekvencím. Pro každou frekvenci bylo provedeno nejméně deset opakování měření minimálně po dobu 3 s (pro nízké frekvence 10–100 Hz byl čas prodloužen na 10 s).

Pro neznámý vzorek byl vytvořeným softwarem automaticky proveden rozsah měření odpovídající budičím frekvencím použitých u etalonů a bylo vytvořeno adekvátní pole reprezentativních komplexních čísel. Toto pole komplexních čísel neznámého vzorku bylo porovnáno s poli jednotlivých etalonů, a to na dané frekvenci jako vektorová vzdálenost v komplexní rovině. Vyhodnocovací software vyhledal minima těchto vektorových vzdáleností a na základě dalších kritérií zvolil nejbližší etalonovou koncentraci ethanolu v palivu. Při optimalizaci softwaru se pro finální stanovení nejbližšího etalonu postupně vyvinulo několik kritérií a jim odpovídajících metod.

### Výsledky a diskuse

První pokusy o rozlišení směsí paliva vedly přes měření vybíjecí charakteristiky neizolované koaxiální sondy. Výsledky těchto měření však odhalily, že dochází k polarizaci elektrod, vzniká elektrický článek, který se při měření vybíjecí charakteristiky nevybije na požadovanou úroveň, a tak nelze danou

metodu použít. K jevům polarizace docházelo i při použití naprosto totožného nerezového materiálu pro výrobu obou elektrod sondy.

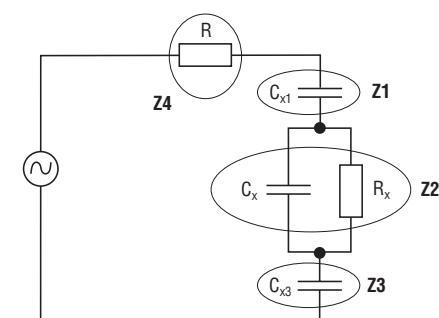
Na obr. 2. je znázorněno schéma zapojení sondy. Po nabití sondy stejnosměrným napětím je rozpojen spínač  $D_{00}$  a měřením poklesu napětí v čase způsobeném samovolným vybíjením se určí časová konstanta  $\tau_1$ . Po opětovném nabití měřicí sondy je současně s rozpojením spínače  $D_{00}$  sepnut spínač  $D_{01}$  a dochází pak k vybíjení sondy i přes přidávaný odpor  $R$ . Měřením poklesu je stanovena časová konstanta  $\tau_2$ . Z těchto dvou časových konstant získáme soustavu 2 rovnic o 2 neznámých ( $C_x$  a  $R_x$ ).

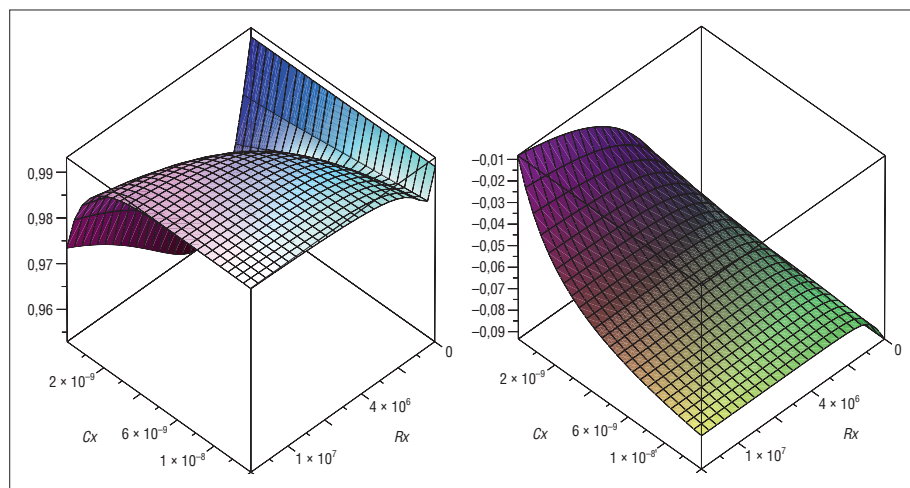
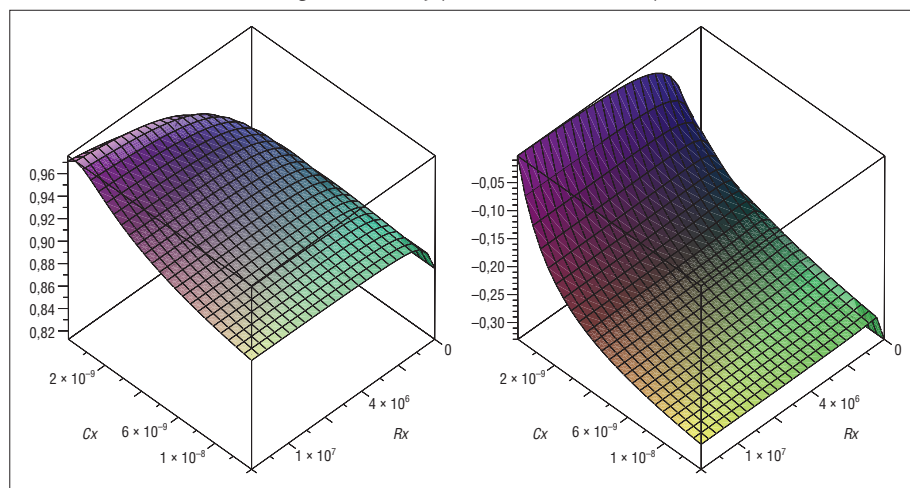
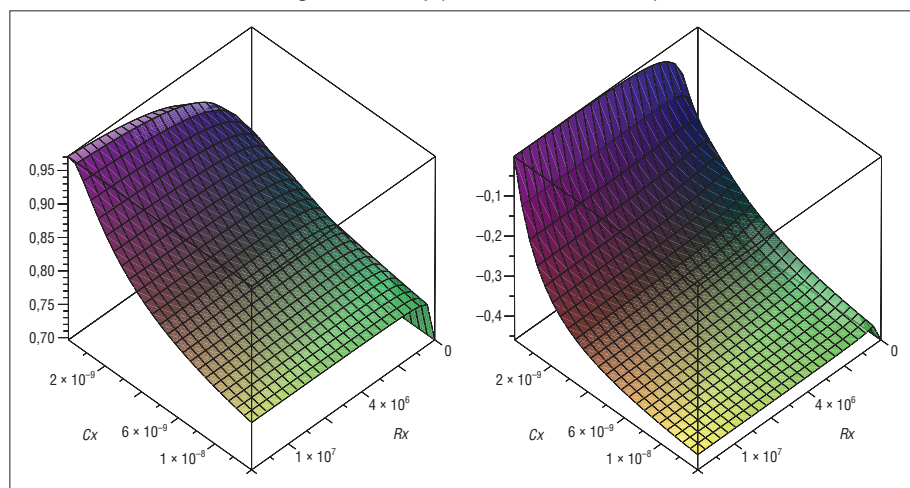
Komplikace vzniklé polarizací elektrod vedly k přechodu na střídavé elektrické veličiny. Bylo použito zapojení formou dvojbranu. Pro napájení byl zvolen harmonický signál s předpokladem, že jak  $U_{10}$  tak  $U_{11}$  budou harmonické.

Na obr. 3. je vidět, že do měřeného obvodu jsou vloženy ještě operační zesilovače pro zvýšení impedance měřicího vstupu, aby nebyl ovlivňován měřený obvod impedancí měřicí karty. Obvody jsou vloženy do každé větve kvůli fázovému posunu, který vytvářejí. Jejich vliv na měřené veličiny je tak nulový.

Při pozorování měřeného obvodu osciloskopem byl opět zjištěn vliv polarizačních jevů, proto byla neizolovaná sonda vyměněna za sondu koaxiální izolovanou. Jako první byla použita sonda s teflonovou izolační vrstvou, ale i u této sondy byla měřením zjištěna polarizace, která byla přisouzena zjištění nemožnosti zajistit nepórovitost teflonového povrchu. Jako další byla použita původní neizolovaná sonda ošetřena lakem. Vrstva laku na sondě však byla nerovnoměrná, nebylo možné tedy dostatečně přesně určit kapacitu izolační vrstvy, proto jako další možnost ověření metody byla použita desková sonda, kde izolace jednotlivých desek byla podstatně jednodušší.

Obr. 4. Náhradní schéma obvodu izolované sondy



Obr. 5. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 25$  HzObr. 6. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 100$  HzObr. 7. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 175$  Hz

Nevýhodou konstrukčního řešení deskové sondy je komplikovanější montáž do palivového systému vozidla. Tyto sondy jsou při použití nainstalovány v nádrži vozidla, takže po natankování se po nějakou dobu chodu motoru může lišit koncentrace

ethanolu v nádrži s koncentrací ethanolu ve směsi paliva vstříkovaného do motoru, jelikož se jedná o zbytky směsi v palivovém potrubí, které nebyly s palivem v nádrži promíchány. Konstrukční provedení deskové sondy přineslo zjednodušení výpočtů přenosové funkce obvodu, protože plocha elektrod se vyrovnala.

Základní vlastností prvků ve střídavých elektrických obvodech je impedance  $Z(\Omega)$ . Impedance je fyzikální veličina vyjadřující zdánlivý odpor prvku a fázový posun napětí proti proudu, který tento prvek vyvolá. Je to veličina vektorová, lze ji tedy vyjádřit velikostí amplitudy a úhlem fázového posunutí  $\varphi$  nebo komplexním číslem.

$$Z = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \quad (4)$$

kde  $U$  je střídavé napětí v daném obvodu (V),

$I$  je proud v daném obvodu (A).

Následuje vyjádření impedancí základních prvků, se kterými se v obvodech pracuje:

Impedance odporu (resistance)

$$Z = R \quad (\Omega) \quad (5)$$

kde  $R$  je resistance ( $\Omega$ ).

Impedance cívky (induktance)

$$Z = j \cdot \omega \cdot L \quad (\Omega) \quad (6)$$

kde  $L$  je induktance cívky (H),

$\omega$  je úhlová rychlost ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ),

$j$  je imaginární jednotka.

Impedance kondenzátoru (kapacitance)

$$Z = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad (\Omega) \quad (7)$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátoru (F).

Ze vztahů plyne, že impedance je závislá na frekvenci, protože

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (8)$$

kde  $f$  je frekvence (Hz).

Přenosová funkce systému se tak dá vyjádřit jako poměr součtu impedancí sondy k součtu impedancí celého obvodu (obr. 4).

$$G = \frac{Z1 + Z2 + Z3}{Z1 + Z2 + Z3 + Z4} \quad (-) \quad (9)$$

kde  $Z_1$  a  $Z_3$  představují impedance odpovídající izolačním vrstvám sondy ( $\Omega$ ),  $Z_2$  je impedancí směsi paliv ( $\Omega$ ),  $Z_4$  odpovídá impedanci do měřicího obvodu vřazeného odporu, který ovlivňuje citlivost měřicí sondy při určitých frekvencích ( $\Omega$ ). Velikost tohoto odporu byla určena simulací v závislosti na předpokládané impedanci palivové směsi  $Z_2$  a rozsahu použitelných frekvencí měřicí aparatury.

Jednotlivé impedance jsou pak vyjádřeny:

$$Z_1 = \frac{-j}{\omega \cdot C_{x1}} \quad (\Omega) \quad (10),$$

kde  $C_{x1}$  je kapacita izolační vrstvy jedné elektrody (F).

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \omega \cdot C_x \cdot j} + \frac{R_x}{1 + \omega \cdot C_x \cdot R_x \cdot j} \quad (\Omega) \quad (11),$$

kde  $R_x$  je odpor zkoumané směsi paliva ( $\Omega$ ),  $C_x$  je její kapacita (F).

$$Z_3 = \frac{-j}{\omega \cdot C_{x3}} \quad (\Omega) \quad (12),$$

kde  $C_{x3}$  je kapacitance izolační vrstvy druhé elektrody (F).

$$Z_4 = R \quad (\Omega) \quad (13),$$

kde  $R$  je resistance známého vloženého odporu ( $\Omega$ ).

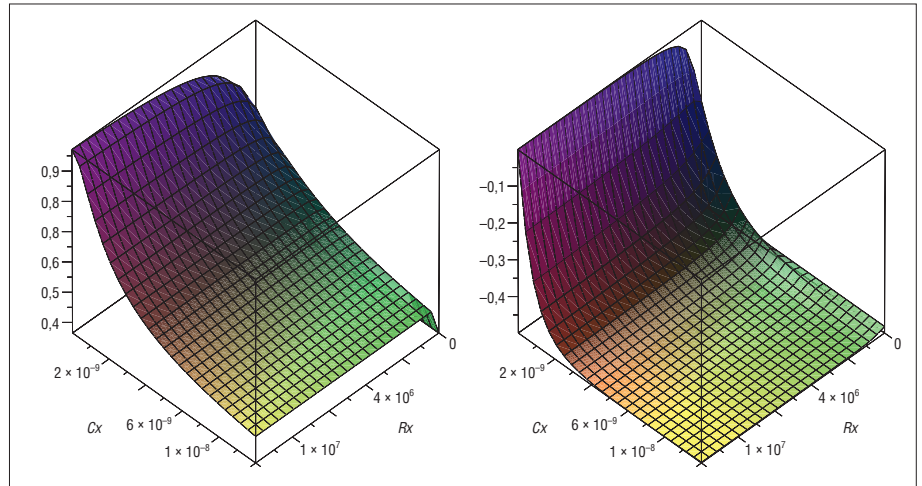
Po dosazení dílčích impedancí pak dostaneme následující vztah pro přenosovou funkci obvodu:

$$G = \frac{-\frac{j}{\omega \cdot C_{x1}} + \frac{1}{R_x + \omega \cdot C_x \cdot j} - \frac{j}{\omega \cdot C_{x3}}}{-\frac{j}{\omega \cdot C_{x1}} + \frac{1}{R_x + \omega \cdot C_x \cdot j} - \frac{j}{\omega \cdot C_{x3}} + R} \quad (-) \quad (14).$$

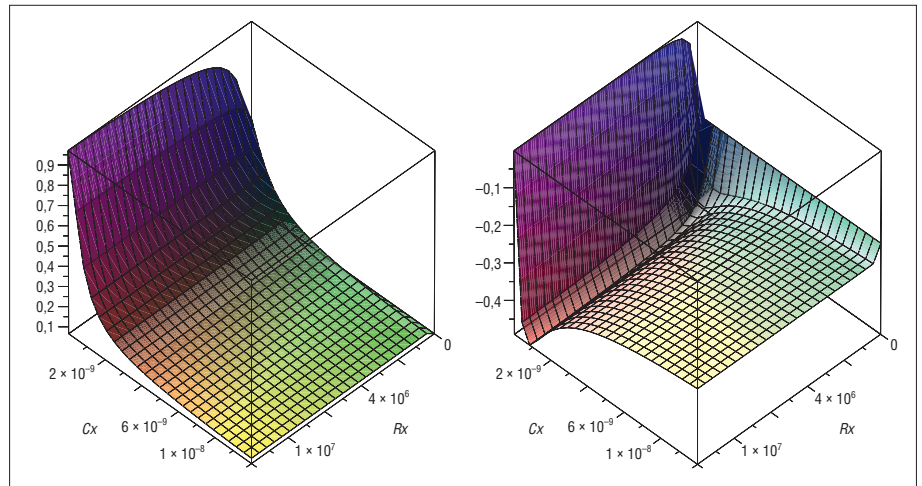
Z rovnic je patrné, že průběh přenosové funkce  $G$  je ovlivněn volbou předřadného odporu  $R$  a použitou měřicí frekvencí.

Předřadný odpor primárně moduluje amplitudu signálu přenosové funkce, a proto byl výpočty a experimentálními měřeními určen odpor  $R = 3 \cdot 10^5 \Omega$  jako nejvhodnější pro měření rozsah směsí paliv a měřicích frekvencí. Resistance měřených

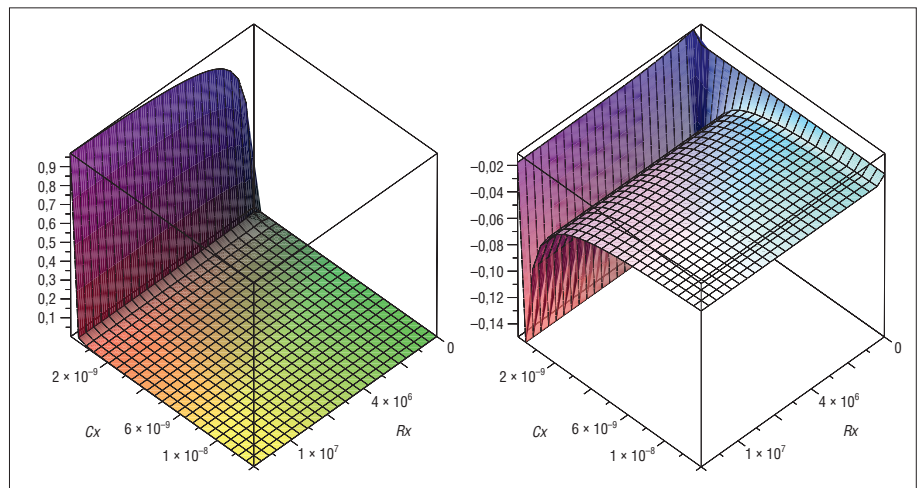
Obr. 8. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 350 \text{ Hz}$



Obr. 9. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 1 \text{ kHz}$



Obr. 10. Průběh reálné a imaginární složky přenosové funkce  $G$  pro  $f = 10 \text{ kHz}$



palivových směsí se může pohybovat od velmi nízkých hodnot až po rezistenci benzínu v řádech  $10^6 \Omega$ . Kapacitance se mění v řádech  $10^{-12}$  až  $10^8 \text{ F}$ . Kapacitance izolačních vrstev sondy  $C_{x1} = C_{x3} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ F}$ .

Grafy (obr. 5. až obr. 10.), které jsou výsledkem simulací přenosové funkce, byly provedeny v programu Maple a ukazují, jak se mění reálné (levá část grafu) a imaginární (pravá část grafu) složky přenosové funkce v závislosti na měnící se budící frekvenci.

Výchozí předpoklad zní: palivo s větším podílem benzínu bude mít vyšší hodnotu  $R_x$  a nižší hodnotu  $C_x$ , než palivo s větším podílem ethanolu.

Podle tohoto předpokladu pak je například z grafů na obr. 5. patrné, že palivové směsi s vyšším obsahem benzínu jsou narozdíl od směsí s vyšším obsahem ethanolu poměrně dobře rozlišitelné jak v reálné složce přenosové funkce (ReG – levý graf), tak v imaginární složce přenosové funkce (ImG – pravý graf).

Jak ukazují grafy na obr. 6. až obr. 10., s rostoucí frekvencí (kolem 1 kHz) se zlepšuje rozpoznatelnost směsí s vyšším obsahem ethanolu jak v reálné tak imaginární složce přenosové funkce. Klesá však schopnost rozpoznávat směsi s vyšším zastoupením benzínu. Při použití vysokých frekvencí se ztrácí rozlišitelnost v ReG a vyšší koncentrace benzínu jsou opět dobře rozlišitelné v ImG.

### Závěr

Z výsledků je také patrné, že průběh přenosové funkce zpravidla není monotónní a vyšší citlivost použitelná pro rozlišení jednotlivých směsí je v rámci dané frekvence poměrně úzká. Takže pro daný rozsah  $R_x$  a  $C_x$ , odpovídající měřeným směsím, se nepodařilo nalézt frekvenci vhodnou pro jednoznačné rozlišení všech koncentrací. Z grafů plyne, že k rozlišení směsí s nižším procentuálním zastoupením ethanolu je vhodnější použití nižších měřících frekvencí a pro vyšší koncentrace ethanolu vyšších měřících frekvencí. Vyjádření izolované sondy proti neizolované bylo rozšířeno o další kapacitance  $C_{x1}$  a  $C_{x3}$ . Tyto kapacitance izolačních vrstev sondy patří do okrajových podmínek a je velmi obtížné je určit. Proto byl učiněn závěr, že pro rozlišení směsí paliva s přesností potřebnou pro řízení spalovacího motoru stačí vytvořit databázi přenosových funkcí vzorků a srovnávací

metodou určit příslušný nejbližší vzorek. Během měření však je zcela nutnou podmínkou zajistit minimální odpařování z hladiny směsi, což se pro praktickou realizaci sondy v nádrži či ve vedení paliva ukazuje jako značně problematické.

*Příspěvek byl zpracován s podporou projektu IP35/2015 Aplikace bezdrátových komunikačních protokolů v systému palubní diagnostiky vozidel financovaného Interní grantovou agenturou AF MENDELU.*

### Souhrn

V článku je uvedena metoda detekce v palivové směsi tvořené ethanolem a benzinem. Tato metoda byla aplikována v reálných podmínkách palivového systému nově, známy jsou pouze předchozí aplikace bez respektování problematických okrajových podmínek. Jsou detailně popsány metody stanovení elektrických vlastností ve stejnosměrném i střídavém obvodu. Pro ověření metody byla použita paliva z běžné distribuční sítě. Zmíněná metoda může být aplikována na flexi-fuel systémech, neboť přináší přesnější detekci ethanolu než současné zpětnovazební metody stanovení.

**Klíčová slova:** ethanol, flex-fuel, kapacitance, impedance, permitivita.

### Literatura

- POLCAR, A. KUMBÁR, V.; ČUPERA, J.: Alcohol Fuel in Passenger Car. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.*, 64, 2016 (3), s. 863–869.
- ŠTĚRBA, P.; ČUPERA, J.: *Autoelektronika*. Brno: Computer Press, 2010, ISBN 978-80-251-2414-7.
- NAKATA, K. ET AL.: The Effect of Ethanol Fuel on a Spark Ignition Engine. In *SAE World Congress*, 2006, 2006-01-3380.
- ČUPERA, J.; POLCAR, A.: Výkonové parametry zážehového motoru při spalování paliva E85. *Listy cukrov. řepař.*, 127, 2011 (11), s. 357–360.
- ROCHA, M. S.; SIMOES, M. J. R.: A simple impedance method for determining ethanol and regulargasoline mixtures mass contents. *Fuel*, 84, 2005, s. 447–452.
- REICHL, J.: *RLC obvody*. [online] [http://www.jreichl.com/fyzika/vyuka/texty/rlc\\_obvody.pdf](http://www.jreichl.com/fyzika/vyuka/texty/rlc_obvody.pdf), cit. 5. 6. 2014.

### Žák, M., Marek, V.: Determination of Ethanol Concentration in Biofuel by Electrical Properties Measurement

The article describes an ethanol-detection method in an ethanol-gasoline blend. This method was newly applied in real-life conditions of a fuel system; the only known previous applications did not respect the problematic marginal areas. The methods of determining electrical properties in direct as well as alternating current are described. The method was verified using fuel from standard distribution network. The given method can be applied in flexi-fuel systems as it gives more precise ethanol detection than the contemporary used feedback determination methods.

**Key words:** ethanol, flex-fuel, capacitance, impedance, permittivity.

### Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Marek Žák, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: marek.zak@mendelu.cz

ROZHLEDY

Prati E., Maniscalco F.

### Jak zlepšit výkon lisování řízků? (How to improve the performance of pulp pressing?)

Odstranění vody z mokrých řízků mechanickým lisováním je mnohem levnější než při tepelném sušení. Je proto nutno, aby se před sušením odstranilo co největší množství vody právě na řízkolisech. Sušení řízků bez předchozího dokonalého odlisování vody je ekonomicky nepřijatelné vzhledem k vysoké energetické spotřebě. Ziskovost cukrovaru proto závisí na mechanickém odvodnění, jehož účinnost závisí jak na výkonnosti lisů, tak na kvalitě mokrých řízků, což hraje základní roli při sledování celkových provozních nákladů. Článek uvádí na příkladu řízkolisů Babbini, jak se předchozí dva faktory uplatňují.

*Zuckerind. / Sugar Ind.*, 138, 2013, č.3, s. 171–174.

Kadlec