

Merilni sistem za nedestruktivno merjenje vlage v lupinastem sadju

Avtorja: Mitja Solar in Anita Solar
E-pošta: mitja.solar@um.si

V članku predstavljamo merjenje vlage v celih lešnikih z merjenjem električnih veličin, kot so upornost, kapacitivnost in impedanca. Opisan je pomen vlage v plodovih, podane so električne meritve vzorcev lešnikov in predstavljena je metoda gradnje merilnega sistema.

Pomen vlage v lupinastem sadju

Pri lupinastem sadju, kot so lešniki, je zelo pomembno, da jih po obiranju hitro in primerno posušimo. V nasprotnem primeru se na njih rade pojavijo plesni, zaradi katerih je kakovost jedrc zmanjšana. V najslabših primerih pride celo do gnitja jedrc.

Lešniki zorijo od zadnje dekade avgusta do konca septembra, odvisno od sorte in vremenskih pogojev. V tem času vsebujejo od 16 do 30 %, v deževnih letih celo do 50 % vlage in so zelo dovzetni za procese kvarjenja. Zato jih moramo v najkrajšem možnem času posušiti, tako da imajo plodovi v luščini 12 % vlage, jedrca pa 6 % (UNECE, 2010) [1]. Ciljno vlago dosežemo s sušenjem plodov v sušilnicah pri temperaturi od 30 do 35 °C. Sušenje traja od 48 do 72 ur in je odvisno od začetne stopnje vlage in vremenskih razmer v času spravila plodov. V deževnem obdobju poteka bistveno dlje kot v suhem in sončnem. Ker lešniki v posameznem nasadu dozorevajo postopoma, običajno v dva do tritedenskem intervalu, je izhodiščna vsebnost vlage v plodovih nehomogena. Da bi jih primerno posušili, v praksi med sušenjem vsakih nekaj ur kontroliramo vlago plodov. Za to potrebujemo hitro, učinkovito in zanesljivo metodo merjenja vlage tako med sušenjem kot tudi med skladiščenjem lešnikov, vse do prodaje.

V članku bomo na kratko predstavili najpogostejše metode meritev vlage v lupinastem sadju ter opisali lastno metodo in merilnik vlage v lešnikih, ki smo ju razvili na osnovi meritev električnih lastnosti plodov in deloma že opisali v strokovni literaturi [2, 3, 4].

Definicija vlage

Vlago jedrc (ang. moisture content - MC) izračunamo iz izmerjenih mas jedrc pred sušenjem $m_{vlažnih}$ in mase suhih jedrc po sušenju m_{suhih} po enačbi:

$$MC = 100 \times \frac{m_{vode}}{m_{vlažnih}} [\%] = 100 \times \frac{m_{vlažnih} - m_{suhih}}{m_{vlažnih}} [\%]$$

kjer je m_{vode} masa vode v jedrcu pred sušenjem. Enaka enačba velja tudi za cele plodove.

Meritve vlage

V praksi se najpogosteje uporabljajo destruktivne metode merjenja vlage. Pri njih vzorec plodov zmeljemo in ga po meritvi zavržemo. Ker je potrebno vlago kontrolirati večkrat v teku sušenja, je ta metoda časovno zamudna. Zato so pri uporab-

nikih bolj zaželeno nedestruktivne metode, pri katerih plodov ne poškodujemo in so tudi hitreje izvedljive.

Referenčna standardna metoda merjenja vlage

Najbolj znana in najpogosteje uporabljena destruktivna metoda je referenčna standardna metoda (ISO665-2000). Zajema merjenje vlage s tehtanjem in sušenjem vzorca pri temperaturi $103 \pm 2^\circ\text{C}$ in normalnem zračnem tlaku. Sušenje poteka, dokler se masa vzorca ne ustali. Da bi bilo sušenje vzorca čim hitrejše, ima merilnik vgrajen mlinček za mletje vzorca, sito z okroglimi luknjami premera 3 mm, posodico iz stekla, porcelana ali nekoroziivne kovine, ki omogoča hrambo $0,2\text{g}/\text{cm}^2$ približno 5 mm višine ter električni grelec s termostatom, ki regulira temperaturo med 101 in 105°C . V standardu je izbrana tri-urna inicializacijska perioda. Po njej se izmeri masa jedrca in določi vlaga. Vzorec je velik najmanj 100 g jedrc ali vsaj 200 g plodov v luščini. Vzorec se razreže in ne zmelje, da ne pride do nastanka olja. Za merilni vzorec se izbere 10 g iz celotnega vzorca in pri celih plodovih 15 g. Vzorec je po merjenju neuporaben.

Novejše destruktivne metode temeljijo na merjenju določenih električnih lastnosti plodov. Tak primer je merjenje enosmerne prevodnosti v zmletih arašidih, ki sta ga opisala Kandala in Nelson [5].

Nedestruktivne metode

Nedestruktivne metode so predmet sodobnih raziskav. Pri njih se vlaga določi na podlagi dielektričnih lastnosti materiala z uporabo elektro-impedančne spektroskopije [6, 7, 8]. Ker so dielektrične lastnosti kmetijskih pridelkov tesno povezane s količino vode v njih, lahko zaznavanje dielektričnih lastnosti uporabimo za hitro merjenje njihove vsebnosti vlage [9]. V oreških so to nedestruktivno metodo uporabili za oceno vlage v pekanu, arašidih, kostanju in makadamiji [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Električne lastnost lešnikov

Lešnik v luščini je zelo kompleksen plod, ki vsebuje organske in anorganske spojine, zato je njegova dielektrična konstanta kompleksna. Z meritvami električnih lastnosti ploda so se ukvarjali Ohlsson [19] ter Buffler and Stanford [20]. V vlažnem plodu ima voda najvišjo dielektrično konstanto z vrednostjo približno 78, lešnikovo olje ima dielektrično konstanto približno 3 in druge snovi 1. Znotraj vzorca plodov v sondi je veliko prevodnih in kapacitivnih povezav, ki jih težko natančno opišemo, zato si pomagamo s poenostavljenim električnim

modelom, ki vsebuje vzporedno vezano kapacitivnost C_s in prevodnost G_s . Vzorec opišemo z njegovo admittanco Y_s in je

$$Y_s(j\omega) = G_s + j\omega C_s.$$

Pri višjih frekvencah postane relativna dielektrična konstanta ϵ_r , glede na prazen prostor kompleksna

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r.$$

$$Y_s(j\omega) = j\omega C = j \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = j \frac{\omega \epsilon_0 A}{d} \epsilon'_r + \frac{\omega \epsilon_0 A}{d} \epsilon''_r$$

Izgubni faktor $\tan\delta$ je določen z razmerjem med realnim in imaginarnim delom admittance

$$\tan\delta = \frac{Re\{Y_s(j\omega)\}}{Im\{Y_s(j\omega)\}} = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}.$$

Razvoj lastnega merilnega sistema za nedestruktivno merjenje vlage

Za nedestruktivno metodo merjenja vlage v lešnikih potrebujemo merilnik impedance in ustrezno sondo. Ker so kvalitetne naprave za merjenje impedance cenovno nedostopne, smo razvili merilni sistem, primeren za širšo uporabo. Pri razvoju smo uporabili ustrezno sondo za vzorec plodov, generator sinusne oblike signalov in osciloskop, kot je prikazano na sliki 1.

Sonda z vzorcem plodov

Izdelali smo merilno sondo pravokotne oblike. Merilna sonda z vzorcem lešnikov je narejena iz pleksi-stekla dimenzij 6,2 cm/4 cm/20 cm (dolžina/širina/višina). Dve vzporedno nameščeni kovinski elektrodi dimenzij 5 cm/18 cm (širina/višina) sta med seboj oddaljeni za 3,9 cm in sta pritrjeni na notranji strani sonde ter sta v stiku z merjenim vzorcem plodov. Kapacitivnost prazne sonde je $C_0 = 2,043 \text{ pF}$. Takšna sonda lahko sprejme približno 250 g lešnikov. Sonda je postavljena navpično in v njo stresemo toliko lešnikov, da zapolnijo sondo do vrha in s tem zagotovijo primeren kontakt plodov z elektrodami. Zaradi visokih impedanc vezja je potrebno sondo zaščititi pred zunanjim električnim poljem s kovinskim oklopom, vezanim na maso generatorja.

Merjenje in obdelava rezultatov

Na osnovi meritev vlage po standardni metodi s tehtanjem ter merjenjem napetosti in faznega premika med njima smo izračunali naslednje električne lastnosti plodov: impedanco, upornost in kapacitivnost, dielektrični konstanti, izgubni faktor in premik faznega kota med napetostjo in tokom plodov.

Za posamezno meritev smo potrebovali vzorec s skupno maso 250 g. Uporabili smo več vzorcev in jih ločeno sušili. Nato smo jih stehali in izmerili napetosti in premike faznega kota. Meritve smo opravili pri amplitudi napetosti generatorja 5 V in pri različnih frekvencah od 1 kHz do 1 MHz. Nato smo vzorce sušili in ponovili meritve. Postopek smo ponavljali več dni zapored, vse do trenutka, ko se lastnosti vzorca niso več spreminjale. Na koncu smo jih popolnoma posušili v pečici pri 103 °C. Izmerjene vrednosti napetosti in faznih premikov so predstavljene na sliki 2.

Izračun impedance plodov

Iz izmerjenih vrednosti smo s pomočjo programa za delo s tabelami Excel izračunali impedanco in admittanco vzorcev. Na sliki 3 je predstavljena impedanca plodov

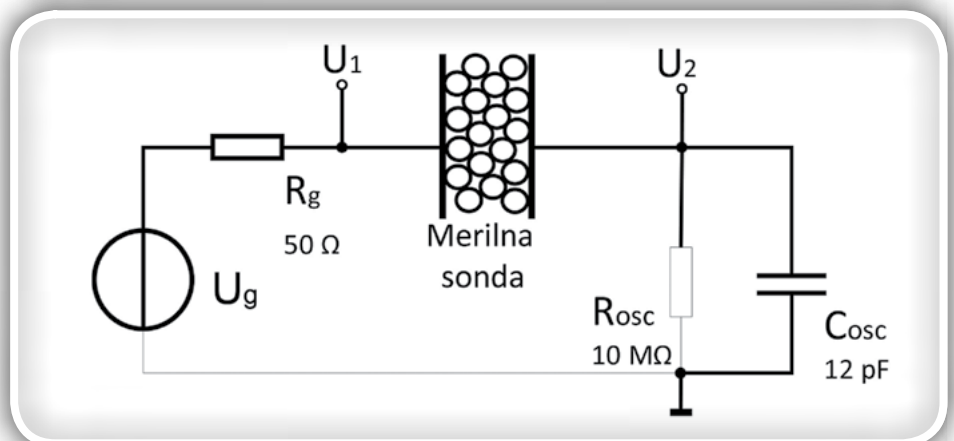
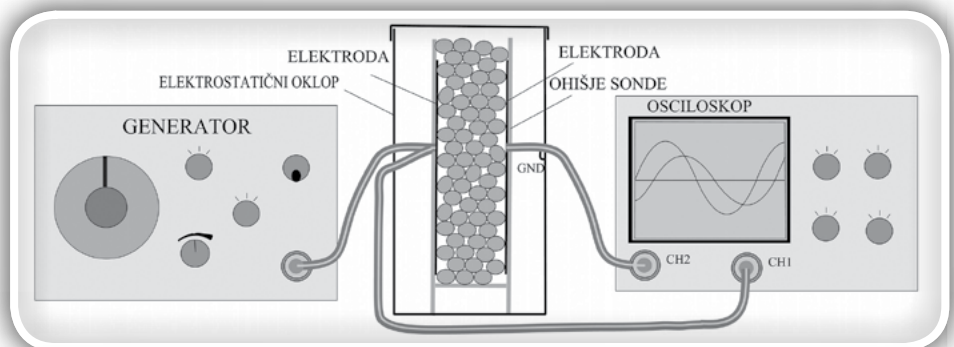
$$Z_s(j\omega) = Re\{Z_s(j\omega)\} + jIm\{Z_s(j\omega)\}$$

Izračunamo jo iz izmerjenega toka $I_s(j\omega)$, ki teče skozi plodove in iz napetosti $U_s(j\omega)$ na njem

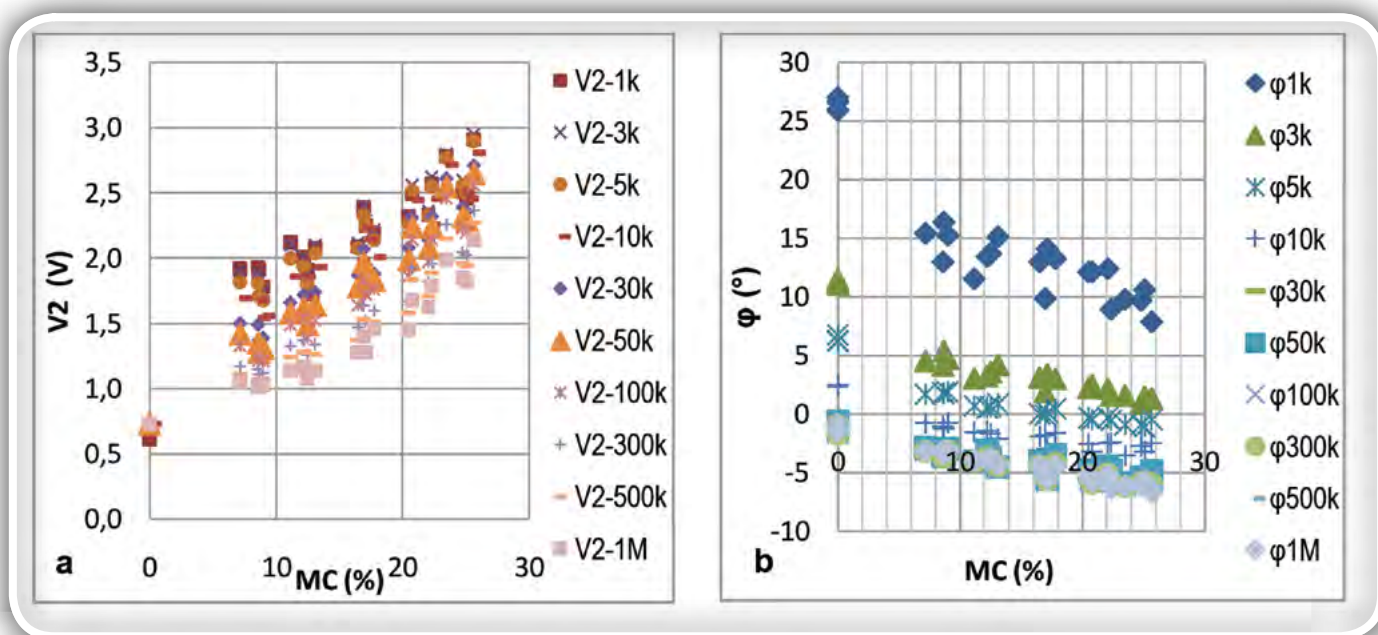
$$Z_s(j\omega) = \frac{U_s(j\omega)}{I_s(j\omega)} = \frac{U_s}{I_s} (\cos\theta + j\sin\theta) \quad (2)$$

Z θ je označen kot med napetostjo in tokom. Ker smo merili napetosti na sondi U_1 in U_2 in fazni premik med njima φ , smo impedanco izračunali

$$Z_s(j\omega) = Re\{Z_{osc}(j\omega)\} \times \left(\frac{U_1}{U_2} \cos\varphi - 1\right) + Im\{Z_{osc}(j\omega)\} \times \frac{U_1}{U_2} \sin\varphi + j \left(Im\{Z_{osc}(j\omega)\} \times \left(\frac{U_1}{U_2} \cos\varphi - 1\right) - Re\{Z_{osc}(j\omega)\} \times \frac{U_1}{U_2} \sin\varphi\right) \quad (3)$$



Slika 1: Merilni sistem: a) blokovna shema in b) električno nadomestno vezje



Slika 2: Izmerjene vrednosti: a) izhodne napetosti in b) fazni premiki med vhodnim in izhodnim signalom

Impedanca $Z_{j_{osc}}(j\omega)$ je impedanca osciloskopa s sondo 10:1, podana z vzporedno vezavo upornosti 10 M Ω in kapacitivnosti 12 pF.

Realni del impedance $Re\{Z(j\omega)\}$ (slika 3a) bi lahko samo pri nižjih frekvencah uporabili za določitev vlage lešnikov, saj je pri višjih frekvencah, na primer, pri frekvenci $f = 500$ kHz pri različnih vsebnostih vlage (npr. 22 % in 7,1 %), vrednost realnega dela impedance enaka, to je 7,1 k Ω . Pri frekvenci $f = 1$ kHz pa je realni del impedance možno uporabiti za meritev, saj je pri 25 % vlage realni del impedance 3,34 M Ω in pri 7,1 % vlage 6,2 M Ω . Velika pa je odvisnost realnega dela impedance od frekvence, saj je na primer pri frekvenci 1 MHz realni del

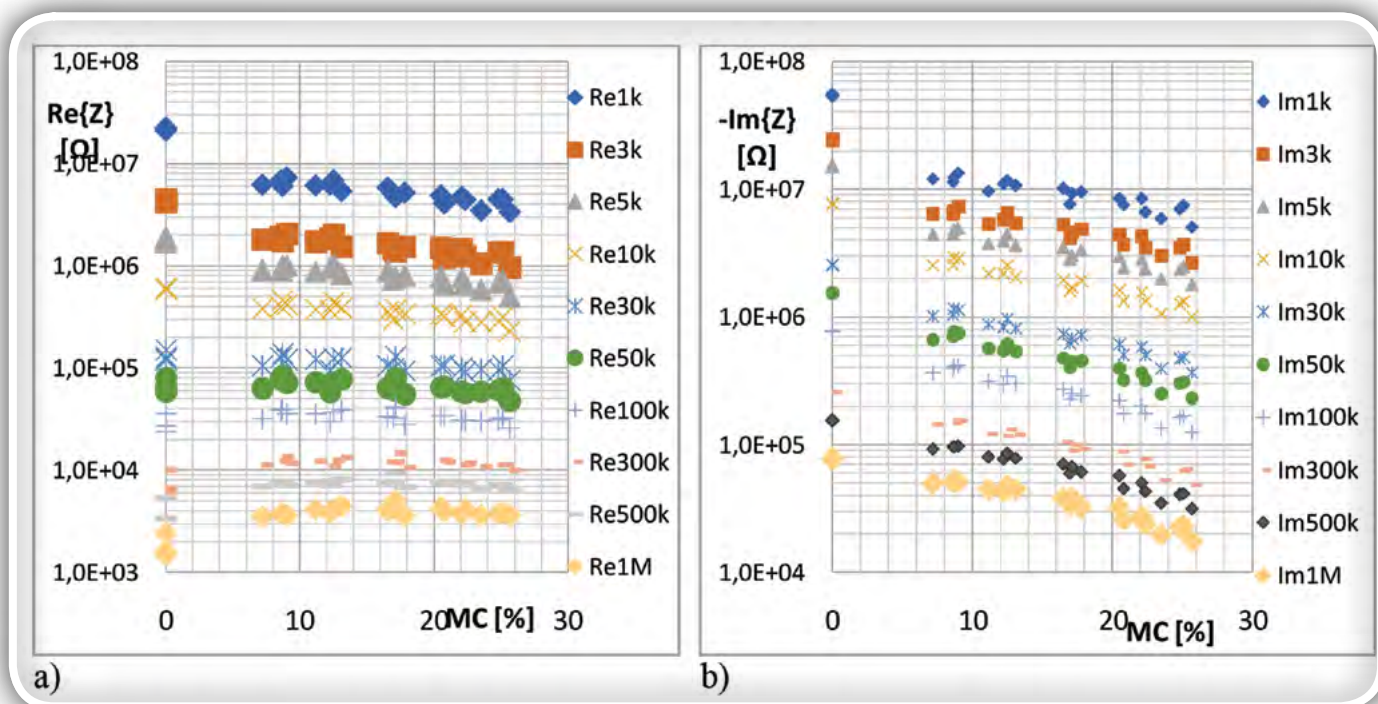
impedance pri 7,1 % vlage 3,5 k Ω in pri 1kHz 6,2 M Ω .

Imaginarni del impedance $-Im\{Z(j\omega)\}$ (slika 3b) je negativen in z naraščanjem vlage njegova vrednost upada, prav tako pa upada z višanjem merilne frekvence. Na primer pri 10 kHz je pri 8,6 % vlage 2,6 M Ω in pri 24,8 % vlage 1,3 M Ω .

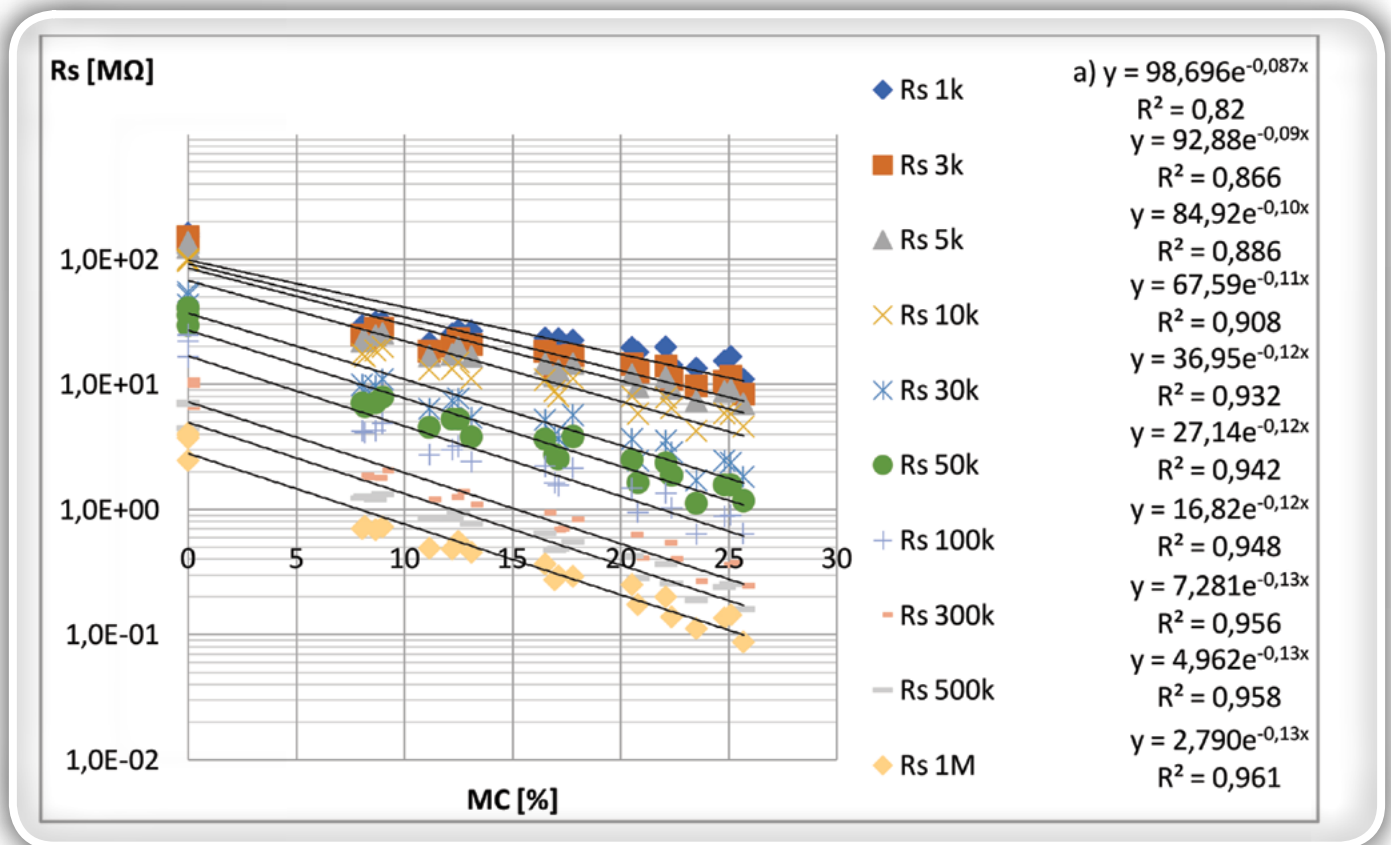
Realni in imaginarni dela impedance sta nelinearno odvisna od vlage in zaradi razpršenosti vrednosti impedanc nista najbolj primerni za meritve.

Izbira modelov za določitev vlage

Modele smo izdelali s pomočjo statistične analize regresija,



Slika 3: Realni in imaginarni del impedance vzorca v sondi



Slika 4: Upornost vzorcev plodov v sondi pri različnih frekvencah z regresijsko funkcijo $Y = a * e^{bx}$ in determinacijskim koeficientom R^2

v kateri smo povezali naslednje električne lastnosti plodov: - upornost R_s , - kapacitivnost G_s in - kombinacijo upornosti in kapacitivnosti, merjenih pri različnih frekvencah in stopnja vlage.

Merilni sistem je zasnovan univerzalno in omogoča programsko spreminjanje modela.

Upornost R_s plodov

Upornost plodov R_s izračunamo iz prevodnosti G_s : $R_s = 1 / G_s$.

Na sliki 4 je predstavljena upornost vzorca plodov R_s pri različnih frekvencah in podane so regresijske krivulje, ki povežejo vlago in upornost vzorca.

Upornost vzorca R_s pri 25 % vlage je 15 MΩ pri frekvenci merjenja 1kHz ($R_{s,1k}$). Vidimo, da upornost vzorca z manjšanjem vlage narašča in je pri 8 % vlage že 30 MΩ. Upornost vzorca je manjša pri višji frekvenci merjenja. Vzorec s 25 % vlago ima pri frekvenci 1 MHz upornost $R_{s,1M} = 136 \Omega$ in pri 8 % vlagi 700 kΩ.

Regresijska krivulja poveže odvisno spremenljivko upornost R_s z neodvisno spremenljivko vlago vzorca MC, tako da poteka med izmerjenimi točkami in ima minimalno vsoto kvadratov odstopanj. Determinacijski koeficient R^2 pove, kako tesna je povezava med odvisno spremenljivko upornostjo $R_s = y$ in neodvisno spremenljivko vlago ($MC = x$). Želimo, da je R^2 čim bližje 1. V našem primeru bi izbrali frekvence, pri katerih je vrednost $R^2 \geq 0,49$.

Model za merjenje vlage z merjenjem upornosti vzorca R_s

Izberimo frekvenco 1MHz in regresijsko krivuljo $y = 2,7906 e^{-13x}$ naša enačba je $R_s = 27906 e^{-0,13 MC [\%]}$. Enačbo obrnemo in določimo vlago v vzorcu

Prvi model:

$$MC [\%] = \frac{1}{0,13} \ln \frac{R_{s,1M}}{2,7906}$$

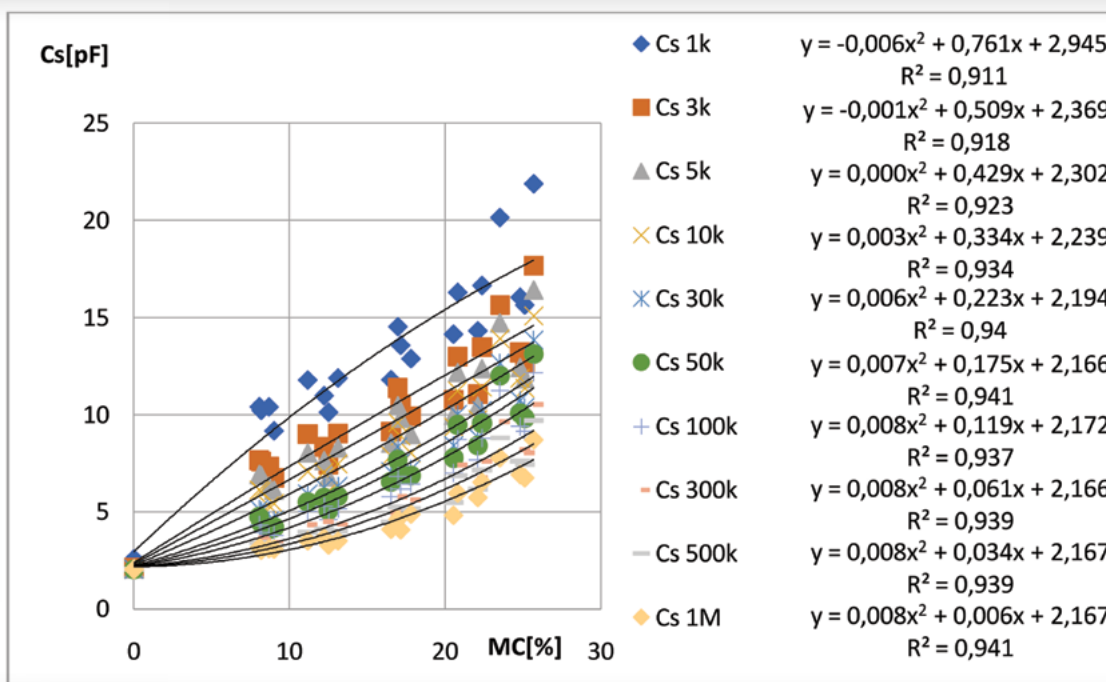
Merilni sistem za prvi model z merjenjem upornosti plodov sestavimo z:

- generatorjem sinusne oblike napetosti s frekvenco 1MHz,
- sondo z vzorcem plodov,
- vezjem, ki izmeri napetost na sondi in tok, ki teče skozi njega ter fazni premik med njima,
- mikrokontrolerjem, ki bo izračunal:
 - » upornost R_s vzorca ter
 - » vlago v vzorcu po enačbi

$$MC [\%] = \frac{1}{0,13} \ln \frac{R_{s,1M}}{2,7906}$$

Kapacitivnost plodov C_s

Kapacitivnost vzorca C_s se z manjšanjem vlage manjša, tako je pri frekvenci merjenja 1MHz in pri 25 % vlagi 6,76 pF ter pri 8 % vlage 3,18 pF. Pri nižji frekvenci merjenja na primer pri 100 kHz je pri 25 % vlagi kapacitivnost plodov 10 pF in pri 1 MHz in enaki vlagi 6,76 pF. Vidimo, da se kapacitivnost plodov z manj-



Slika 5: Kapacitivnost vzorcev plodov v sondi pri različnih frekvencah z regresijsko funkcijo $Y = ax^2 + bx + c$ in determinacijskim koeficientom R^2

šanjem vlage manjša, manjša pa se tudi z višanjem frekvence. Model za merjenje vlage z merjenjem kapacitivnosti vzorca C_s . Izberimo frekvenco 1MHz in regresijsko krivuljo

$$y = 0,0081 x^2 + 0,0064 x + 2,1667$$

ter frekvenco 100 kHz in regresijsko krivuljo

$$y = 0,0081 x^2 + 0,1198 x + 2,1721$$

Naši enačbi sta

$$C_{s\ 1MHz} = 0,0081 MC[\%]^2 + 0,0064 MC[\%] + 2,1667$$

in

$$C_{s\ 100kHz} = 0,0081 MC[\%]^2 + 0,1198 MC[\%] + 2,1721$$

Vidimo da sta koeficienta pri X^2 enaka (0,0081) zato je možno model malce poenostavit, tako da opišemo vlago z razliko kapacitivnosti:

$$\Delta C_{s\ 100k-1M} = C_{s\ 100kHz} - C_{s\ 1MHz} = 0,1134 MC[\%] + 0,0045$$

Enačbo obrnemo in določimo vlago v vzorcu

Drugi model:

$$MC[\%] = \frac{\Delta C_{s\ 100k-1M} - 0,0045}{0,1134}$$

Merilni sistem za drugi model z merjenjem kapacitivnosti plodov sestavimo z:

- generatorjem sinusne oblike napetosti s frekvencama 100

kHz in 1MHz,

- sondo z vzorcem plodov,
- vezjem, ki izmeri napetost na sondi in tok, ki teče skozi nje-ga, ter fazni premik med njima,
- mikrokontrolerjem, ki bo izračunal:
 - » upornost C_s vzorca ter
 - » vlago v vzorcu po enačbi

$$MC[\%] = \frac{\Delta C_{s\ 100k-1M} - 0,0045}{0,1134}$$

Preizkusili smo oba modela in ugotovili, da je standardni odklon prevelik zato smo z multiplo-regresijo poiskali boljši model:

Tretji model:

Merilni sistem za tretji model z merjenjem prevodnosti in ka-pacitivnosti plodov sestavimo z:

- generatorjem sinusne oblike napetosti s frekvencami 3, 10, 30, 50, 100, 500kHz in 1MHz,
- sondo z vzorcem plodov,
- vezjem, ki izmeri napetost na sondi in tok, ki teče skozi nje-ga, ter fazni premik med njima,
- mikrokontrolerjem, ki bo izračunal:
 - » upornost upornosti R_s oziroma prevodnosti G_s in kapaci-tivnosti plodov C_s ter
 - » vlago v vzorcu po enačbi

$$MC[\%] = -4,29 + 259 G_{s\ 3k} + 495 G_{s\ 10k} - 246 G_{s\ 30k} + 443 G_{s\ 50k} - 262 G_{s\ 100k} + 13,3 G_{s\ 500k} - 7,49 \Delta C_{s\ 10k-30k} - 9,45 \Delta C_{s\ 50k-100k} - 5,77 \Delta C_{s\ 500k-1M}$$

Zgradba merilnih sistemov je v vseh treh primerih podobna, razlikuje se le število merilnih frekvenc in kompleksnost izračuna vlage. Za generiranje različnih frekvenc sinusne oblike izberemo DDS oscilator krmiljen z mikrokontrolerjem, izračun modela vlage pa opravi mikrokontroler.

Da preverimo pravilnost delovanja merilnega sistema, je potrebno narediti niz meritev pri različnih vlagah plodov, in sicer najprej s pomočjo referenčne metode in nato še z našim merilnim sistemom. Izračunamo še odstopanja in standardni odklon meritev, da lahko podamo merilno negotovost merilnega sistema. Če bomo takšno napravo uporabili v sušilnici in na prostem, moramo preveriti delovanje tudi pri drugih temperaturah in dopolniti merilno negotovost.

Zaključek

V prispevku smo obravnavali nedestruktivno metodo merjenja vlage lupinastega sadja - lešnikov z merjenjem električnih lastnosti vzorca. Predstavili smo tri modele, ki jih vgradimo v mikrokontroler. Glede na izbrani model smo tudi predlagali gradnike merilnega sistema in predstavili, kako ovrednotimo merilni sistem.

Literatura

- [1] UNECE, 2010. *UNECE Standard DDP-04 Concerning the Marketing and Commercial Quality Control of Hazelnut Kernels*, 2010 ed. United Nations New York, Geneva, p. 7.
- [2] Solar, M., Solar, A., 2008. *Determination of the moisture content in hazelnut fruits with capacitance measurements (in Slovenian with English abstract)*. In: Hudina, Metka (Ed.), *Proceedings of the 2nd Slovene Fruit Growing Congress with International Participation, Krško, January 31 - February 2. Ljubljana. Strokovno sadjarsko društvo Slovenije*, pp. 351-357.
- [3] Solar, M., Solar, A., 2015. *Nedestruktivno določanje vlage v lešnikih z merjenjem mase in impedanca* Zbornik ERK 2015, Portorož, Slovenska sekcija IEEE. 2015, zv. A, str. 281-284
- [4] Solar, M., Solar, A., 2016. *Non-destructive determination of moisture content in hazelnut (Corylus avellana L.)*. *Computers and electronics in agriculture*, 2016, vol. 121, str. 320-330
- [5] Kandala, C.V. K., Nelson, S.O., 2005. *Nondestructive moisture determination in small samples of peanuts by RF impedance measurement*. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 48 (2), 715-718.
- [6] Raistrick, I.D., Franceschetti, D.R., Macdonald, J.R., 2005. *Chapter 2 - theory*. In: Barsoukov, E., Macdonald, J.R. (Eds.), *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, pp. 27-128.
- [7] Venkatesh, M.S., Raghavan, G.S.V., 2005. *An overview of dielectric properties measuring techniques*. *Can. Biosyst. Eng.* 47, 7.15-7.29.
- [8] Agilent Technologies, 2005. *Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Application note, Agilent Literature Number 5989-2589EN*.
- [9] Nelson, S.O., Trabelsi, S., 2012. *Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products*. *J. Microwave Power Electromagn. Energy* 46 (2), 93-107.
- [10] Nelson, S.O., Kandala, C.V.K., Lawrence, K.C., 1992. *Single-kernel moisture determination in grain and nuts by RF impedance measurements*. In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC'92, May 12-14*, pp. 422-424.
- [11] Nelson, S.O., Lawrence, K.C., 1995. *Nondestructive moisture determination in individual pecans by impedance measurement*. *Trans. ASAE* 38 (4), 1147-1151.
- [12] Kandala, C.V.K., Sundaram, Y., 2010. *Estimation of mass ratio of the total kernels within a sample of in-shell peanuts using RF impedance method*. *J. Electr. Comput. Eng.* 2010, 1-5.
- [13] Kandala, C.V.K., Butts, C.L., Lamb, M.C., 2007a. *Performance comparison of RF impedance and DC conductance measurements for single peanut kernel moisture determination*. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 50 (1), 117-122.
- [14] Kandala, C.V.K., Butts, C.L., Nelson, S.O., 2007b. *Capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content in nuts and grain*. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56 (5), 1809-1813.
- [15] Kandala, C.V.K., Butts, C.L., Lamb, M.C., 2008. *Moisture content determination for inshell peanut with a low-cost impedance analyzer and capacitor sensor*. *Trans. ASABE* 51 (4), 1377-1381.
- [16] Kandala, C.V. K., Nelson, S.O., 2005. *Nondestructive moisture determination in small samples of peanuts by RF impedance measurement*. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 48 (2), 715-718.
- [17] Zhu, X., Guo, W., Wu, X., Wang, S., 2012. *Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy*. *J. Food Eng.* 113 (1), 143-150.
- [18] Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., Wang, S., 2013. *Temperature- and moisture dependent dielectric properties of macadamia nut kernels*. *Food Bioprocess Technol.* 6 (8), 2165-2176.
- [19] Ohlsson, T., 1989. *Dielectric properties and microwave processing*. In: Singh, R.P., Medina, A.G. (Eds.), *Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems*. Kluwer Academic Publishers, pp. 73-92.
- [20] Buffler, C.R., Stanford, M.A., 1991. *Effect of dielectric and thermal properties on the microwave heating of foods*. *Micro-wave World* 12, 15-23.