

Skysčių specifinio elektrinio laidumo nustatymas ir jo kompensavimo sistema

J. Daunoras, A. Knyš

*Valdymo technologijų katedra, Kauno technologijos universitetas,
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 300251, el. p. dekeaf@ktu.lt*

Įvadas

Specifinis elektrinis laidumas nusako medžiagos gebėjimą praleisti elektros srovę. Naudojantis šia savybe galima spręsti apie įvairias medžiagos savybes – tiek fizikines, tiek chemines. Nustatyta, kad specifinis elektrinis laidumas turi savybę kisti priklausomai nuo tiriamos medžiagos temperatūros [7]. Šiuolaikinėms technologijoms pažengus į priekį sukurti įvairūs matavimo prietaisai, leidžiantys kompensuoti šią medžiagų savybę keisti specifinį elektrinį laidumą priklausomai nuo temperatūros, siekiant suvienodinti atskaitos sistemą ir gauti patikimą matavimo rezultatą. Vienas iš tyrimo metodų, kuriuo įvertinamas specifinis elektrinis laidumas, yra netiesioginis pieno užšalimo temperatūros nustatymas [2]. Šio metodo esmė yra ta, kad pieno užšalimo temperatūrą galima apskaičiuoti iš pieno sudėties parametrų ir specifinio elektrinio laidumo naudojant 1-os eilės tiesinę lygtį [2,3]. Šio darbo tikslas – išanalizuoti skysčių specifinio elektrinio laidumo įtaką užšalimo temperatūros matavimui.

Skysčių specifinio elektrinio laidumo nustatymo pritaikymas

Klasikinis pieno užšalimo temperatūros nustatymo būdas yra krioskopinis metodas [1]. Šio metodo praktinis pritaikymas gana gailus (ilgiau nei 3 min), be to, reikia kvalifikuoto aptarnaujančiojo personalo. Krioskopinio užšalimo temperatūros nustatymo principas yra mėginio (šiuo atveju – pieno) sušaldymas į ledą (~-3 °C) ir suskaldymas. Skaldymo metu tiriamojo mėginio temperatūra tampa lygi kristalizacijos temperatūrai, kuri ir yra registruojama kaip tyrimo rezultatas. Šis metodas vadinamas pamatiniu skysčio užšalimo temperatūros nustatymo metodu. Jo tikslumas siekia 0,001 °C, tačiau dėl mažos tyrimo spartos ir kitų savybių jis netinka tyrimo laboratorijoms, kurios per trumpą laiką turi iširti tūkstančius mėginių.

Kaip alternatyvą krioskopiniam pieno užšalimo temperatūros nustatymo metodui mes siūlome netiesioginį tyrimo būdą, paremtą pieno sudėties parametrų, specifinio elektrinio laidumo ir užšalimo temperatūros koreliacija [2,3]. Šio tyrimo principas tas, kad naudojantis 1-os eilės daugianariu pieno sudėties parametrų ir pieno užšalimo

temperatūros tarpusavio priklausomybę galima aprašyti tokia lygtimi:

$$UT = a_0 + a_1 * R + a_2 * B + a_3 * L + a_4 * K ; \quad (1)$$

čia UT – prognozuojama užšalimo temperatūra,

R – riebalų kiekis, %,

B – baltymų kiekis, %,

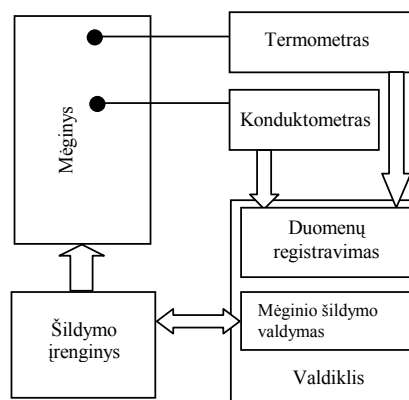
L – laktozės kiekis, %,

K – specifinis elektrinis laidumas, mS*cm⁻¹,

a₀...a₄ – modelio koeficientai.

Kaip parodė eksperimentiniai tyrimai [2,3], šis matematinis modelis gana tiksliai prognozuoja pieno užšalimo temperatūrą: paklaida, tiriant pieną, kuriame nėra pašalinio vandens, neviršijo 0,005 °C, o tiriant pieną, turintį pašalinio vandens paklaida sumažėjo iki 0,002 °C.

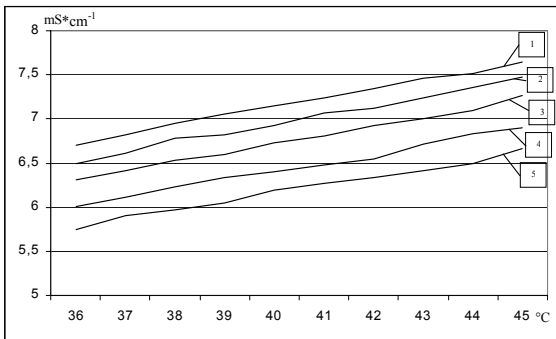
Nustatant užšalimo temperatūrą netiesioginiu metodu, vienas reikšminių faktorių yra specifinis elektrinis laidumas, jo temperatūrinis koeficientas. Remiantis darbo su pieno tyrimo spektrometrais metodikomis [6], optimali pieno mėginio temperatūra yra 40±2 °C, nes kaip tik tokioje temperatūroje tiriamas mėginys gali būti vienodai išmaišytas nesuardant komponentų molekulinės struktūros ir kartu užtikrinamas tikslus tyrimo rezultatas. Tačiau nėra žinoma mėginio temperatūros svyravimo įtaka rezultatų tikslumui.



1 pav. Specifinio elektrinio laidumo priklausomybės nuo temperatūros nustatymo eksperimento schema

Tokiai analizei atlikome eksperimentinius tyrimus pagal 1 pav. parodytą struktūrinę schemą.

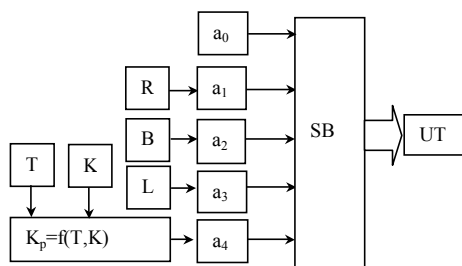
Eksperimentui panaudota 100 natūralių (be pašalinio vandens) pieno mėginių. Mėginiai paeiliui buvo šildomi iki 45 °C registruojant temperatūrą ir matuojant specifinį elektrinį laidumą. Registravimo žingsnis 0,5 °C. Visi naudojami įrenginiai patikrinti ir kalibruoti. Tyrimo rezultatai pateikti 2 pav.



2 pav. Skysčio specifinio elektrinio laidumo priklausomybės nuo temperatūros tyrimo rezultatai

2 paveiksle pavaizduota, kaip kinta skirtingų mėginių specifinis elektrinis laidumas. Parodyta kreivių šeima, nes skirtingų pieno mėginių specifinis elektrinis laidumas (mažiausio specifinio elektrinio laidumo mėginys – 5 kreivė, didžiausio – 1 kreivė) skiriasi dėl skirtingos mėginio kiekybinės sudėties, ištirpusių mineralinių medžiagų kiekio. Natūralaus pieno specifinis elektrinis laidumas kinta nuo 6,2 iki 8,2 mS*cm⁻¹ (esant 40 °C temperatūrai). Kaip matome iš 2 pav., pieno specifinis elektrinis laidumas didėja kylant mėginio temperatūrai. Gautas temperatūrinis specifinio elektrinio laidumo kitimo koeficientas $\alpha=0,015^{\circ}\text{C}^{-1}$ yra toks pat kaip nurodyta [4], ir artimas vertei, nurodytai [5] ($\alpha=0,017^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ši temperatūros ir specifinio elektrinio laidumo kitimo priklausomybė mus dominančioje temperatūroje (apie +40 °C) gali būti aprašyta tiesine priklausomybe (2).

Panaudoję gautus rezultatus ir (1) lygtį, atliekame matematinį modeliavimą pagal mūsų sudarytą struktūrinę schemą, parodytą 3 pav.



3 pav. Matematinio modelio struktūrinė schema:

T, K, R, B, L – temperatūros, specifinio elektrinio laidumo, riebalų, baltymų, laktozės rodikliai atitinkamai;
 $K_p=f(T, K)$ – specifinio elektrinio laidumo K perskaičiavimo, atsižvelgiant į temperatūrą T, modulis;
 $a_0...a_4$ – modelio koeficientai;
 SB – skaičiavimo blokas;
 UT – užšalimo temperatūra

Matematiniam modeliavimui naudojome koeficientų vertes, pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. Matematinio modelio koeficientai

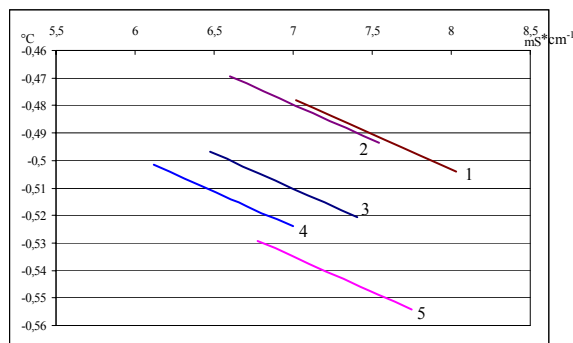
Koeficientas	Koeficiento vertė	Įvertinamas parametras
a_0	-0,0186	laisvasis narys
a_1	-0,0153	riebalai
a_2	-0,0061	baltymai
a_3	-0,0407	laktozė
a_4	-0,0258	specifinis el. laidumas

Specifinio elektrinio laidumo reikšmės skaičiavimo bloke perskaičiuojamos pagal (2) formulę:

$$k_p = k / (1 + \alpha * (T - 40)); \quad (2)$$

čia k_p – specifinis elektrinis laidumas, esant temperatūrai $T=40^{\circ}\text{C}$, mS*cm⁻¹,
 k – specifinis elektrinis laidumas, esant temperatūrai T , mS*cm⁻¹,
 T – temperatūra, °C,
 α – pieno specifinio elektrinio laidumo temperatūrinis koeficientas.

Gauti matematinio modeliavimo rezultatai pateikti 4 pav.



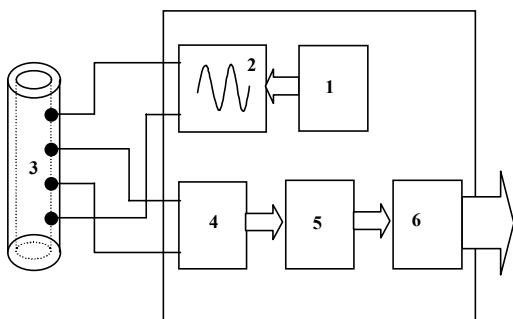
4 pav. Pieno užšalimo temperatūros nustatymo tikslumo kitimo, keičiantis mėginio temperatūrai, modeliavimo rezultatai

Modeliavimo metu buvo parinktos kelios pastovios R, B, L reikšmių kombinacijos, specifinis elektrinis laidumas buvo perskaičiuojamas pagal (2) f-lę, laikant, kad temperatūra T kinta (+36...+45)°C intervale, kitimo žingsnis 0,5 °C.

Kaip rodo šio eksperimento rezultatai (4 pav., 1–5 kreivės), mėginio temperatūrai pakitus 1°C, prognozuojama pieno užšalimo temperatūros vertė pakinta apie 0,003 °C. Pavaizduota kreivių šeima, nes, esant skirtingoms pieno sudėties parametrams (riebalų 2...7 %, baltymų 2...5 %, laktozės 3...6 %) ir specifinio elektrinio laidumo (6,2...8,2 mS*cm⁻¹) kombinacijoms, iš (1) lygties gaunamos skirtingos užšalimo temperatūros vertės. Kaip matome, pieno užšalimo temperatūra, keičiantis mėginio temperatūrai, o kartu ir jo specifiniam elektriniam laidumui, keičiasi pagal tiesinį dėsnį. Matematinis modeliavimas įrodė tiriamojo mėginio temperatūros įtaką bei specifinio elektrinio laidumo įvertinimo svarbą rezultatų tikslumui.

Elektrinio laidumo bei temperatūros kitimo įtaka užšalimo temperatūros nustatymui priklauso nuo pieno mėginiuose esančio pašalinio vandens kiekio. Šiam teiginiui įrodyti buvo atliktas eksperimentas pagal 5 pav. parodytą mūsų sudarytą struktūrinę schemą.

5 pav. schemoje signalas iš šaltinio 2 patenka į kraštinius matavimo zondo 3 gnybtus ir susidaro uždara elektros grandinė „srovės šaltinis – bandinys – srovės šaltinis“. Srovės šaltinio 2 parametrai nustatomi bloke 1. Tarp vidinių zondo gnybtų išmatuotas įtampos kritimas, proporcingas bandinio varžai, o kartu ir skysčio specifiniam elektriniam laidumui (2), registruojamas matavimo schemoje 4. Matavimo rezultatas perduodamas į surinkimo ir apdorojimo bloką 5, iš kurio per perdavimo bloką 6 (duomenų formatui suderinti) galutiniai duomenys pateikiami vartotojui. Dažnis 3 kHz pasirinktas todėl, kad mūsų naudotoje matavimo schemoje esant tokiam dažniui optimaliai suderinamas matavimo traktas ir išvengiama rezultato iškraipymo.



5 pav. Pieno specifinio elektrinio laidumo nustatymo priklausomai nuo esamo pašalinio vandens struktūrinė schema:

- 1 - srovės šaltinio parametrų nustatymo blokas,
- 2 - 3 kHz dažnio kintamosios srovės šaltinis,
- 3 - matavimo zondas,
- 4 - įtampos kritimo zonde matavimo schema,
- 5 - duomenų surinkimo ir apdorojimo blokas,
- 6 - duomenų perdavimo blokas

Tokia schema užtikrina, kad tarp zonde esančių vidinių matavimo taškų ir išorinių taškų, prie kurių prijungtas srovės šaltinis, nėra tiesioginio elektrinio ryšio, todėl išvengiama galimo matavimo rezultatų netikslumo. Kintamosios srovės šaltinis pasirinktas todėl, kad tiriamajame skystyje gausu įvairių mineralinių medžiagų bei druskų, spartinančių matavimo aikštelių koroziją (kartu iškraipomi matavimo rezultatai), o esant kintamajai srovei šis efektas pasireiškia ne taip greitai.

Buvo paruoštas 100 mėginių rinkinys, kurio dalyje mėginių (60 vnt.) nebuvo pašalinio vandens (natūralus nekonservuotas neparūgštėjęs pienas), o į kitus (40 vnt.) – papildomai įpilta pašalinio vandens. Pamatiniais metodais (krioskopu) buvo nustatytos šių mėginių užšalimo temperatūros. Po to mėginiai buvo pašildyti vandens vonelėje, kiekvienas atskirai ir iki pasiekus skirtingas temperatūras. Pašildyti mėginiai buvo ištirti IR spindulių pieno sudėties matuokliu *LactoScope 550*, tuo pačiu metu registruojant mėginio specifinį elektrinį laidumą matuokliu, negalinčiu automatiškai koreguoti rezultatų pagal mėginio temperatūrą.

Eksperimento rezultatai ir apskaičiuotos specifinio elektrinio laidumo vertės, atsižvelgiant į mėginio temperatūrą bei koeficientą $\alpha=0,015 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, pateikti 2,3 lentelėse (lentelėse pateikiami atsitiktine tvarka išrinkti 25 tyrimo rezultatai) ir 6, 7, 8, 9 paveiksluose. 6–9 paveiksluose sujungti 2 ir 3 lentelių duomenys.

2 lentelė. Prognozės rezultatai įvertinus specifinio elektrinio laidumo priklausomybę nuo temperatūros (pienas be pašalinio vandens)

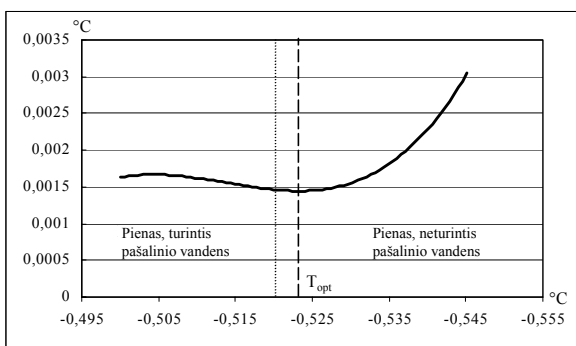
Eil. Nr.	UT*, nustatyta krioskopu, °C	SEL** be kompensacijos, mS/cm	SEL su kompensacija, mS/cm	SEL pokytis, mS/cm	UT prognozė, °C	UT skirtumas, °C
1	2	3	4	5	6	7
1	-0,523	6,50	6,38	0,12	-0,526	-0,003
2	-0,524	6,56	6,52	0,04	-0,524	0
3	-0,526	5,83	5,68	0,15	-0,528	-0,002
4	-0,526	6,62	6,68	-0,06	-0,525	0,001
5	-0,526	7,01	7,10	-0,09	-0,524	0,002
6	-0,526	6,54	6,36	0,18	-0,527	-0,001
7	-0,527	7,39	7,32	0,07	-0,526	0,001
8	-0,527	6,80	7,14	-0,34	-0,529	-0,002
9	-0,528	6,80	7,04	-0,24	-0,527	0,001
10	-0,529	6,81	7,03	-0,22	-0,526	0,003
11	-0,530	6,80	7,12	-0,32	-0,529	0,001
12	-0,531	6,89	7,08	-0,19	-0,530	0,001
13	-0,531	6,67	6,87	-0,20	-0,528	0,003
14	-0,534	7,10	7,27	-0,17	-0,533	0,001
15	-0,545	6,89	7,24	-0,35	-0,542	0,003

*) UT – užšalimo temperatūra, **) SEL – specifinis elektrinis laidumas

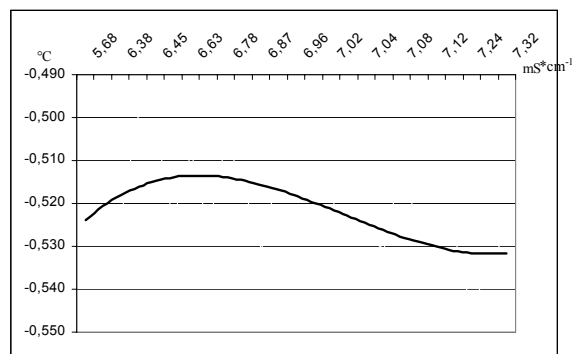
3 lentelė. Prognozės rezultatai įvertinus specifinio elektrinio laidumo priklausomybę nuo temperatūros (piene yra pašalinio vandens)

Eil. Nr.	UT*, nustatyta krioskopu, °C	SEL** be kompensacijos, mS/cm	SEL su kompensacija, mS/cm	SEL pokytis, mS/cm	UT prognozė, °C	UT skirtumas, °C
1	2	3	4	5	6	7
1	-0,500	6,59	6,41	0,18	-0,499	0,001
2	-0,503	6,59	6,45	0,14	-0,501	0,002
3	-0,505	6,82	6,78	0,04	-0,507	-0,002
4	-0,508	6,80	6,63	0,17	-0,510	-0,002
5	-0,511	6,84	7,08	-0,24	-0,514	-0,003
6	-0,512	6,83	6,96	-0,13	-0,511	0,001
7	-0,516	6,80	6,86	-0,06	-0,516	0
8	-0,518	7,07	7,02	0,05	-0,520	-0,002
9	-0,518	6,83	7,02	-0,19	-0,520	-0,002
10	-0,518	6,85	6,96	-0,11	-0,518	0

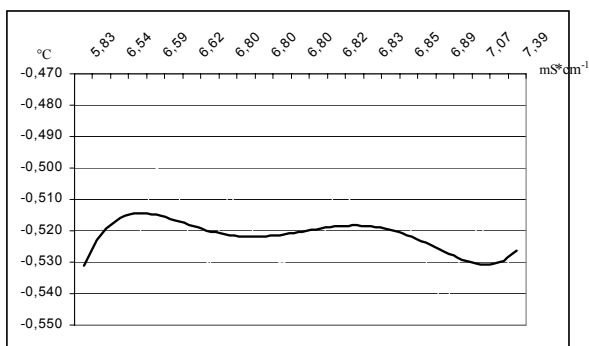
*) UT – užšalimo temperatūra, **) SEL – specifinis elektrinis laidumas



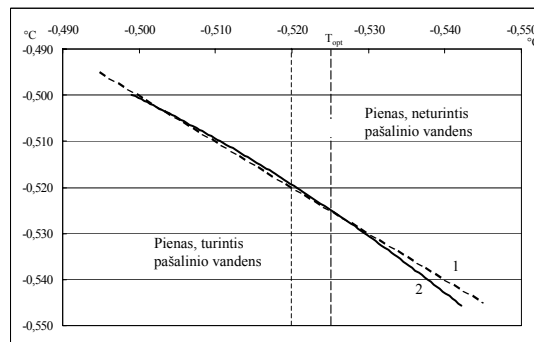
6 pav. Užšalimo temperatūros prognozės paklaidos priklausomybė nuo mėginio užšalimo temperatūros



8 pav. Užšalimo temperatūros priklausomybė nuo specifinio elektrinio laidumo atlikus perskaičiavimą pagal (2) lygtį



7 pav. Užšalimo temperatūros priklausomybė nuo specifinio elektrinio laidumo neįvertinus pokyčio dėl temperatūros



9 pav. Pamatiniu metodu nustatytos ir apskaičiuotos užšalimo temperatūros santykis

Kaip matome iš gautų eksperimento rezultatų (2, 3 lent.), specifinio elektrinio laidumo priklausomybės nuo temperatūros įvertinimas sumažino pieno užšalimo temperatūros prognozės paklaidą iki 0,003 °C tiek mėginių, turinčių pašalinio vandens, tiek jo neturinčių. 6 pav. matome paklaidos modulio kitimo pobūdžio grafiką, kaip priklausomybę nuo mėginio užšalimo temperatūros (lentelių 2–7 grafos). Iš grafiko matyti, kad paklaida būna mažiausia (~0,0015 °C), kai užšalimo temperatūra T_{opt} apie -0,523 °C. Esant žemesnei užšalimo temperatūrai (piene

nera pašalinio vandens) paklaida eksponentiškai didėja ir gali siekti 0,003 °C. Kai piene yra pašalinio vandens (užšalimo temperatūra aukštesnė nei -0,520 °C) paklaida išlieka stabili – 0,0015...0,002°C ribose.

7 ir 8 pav. atitinkamai pavaizduota užšalimo temperatūros priklausomybė nuo specifinio elektrinio laidumo neatlikus ir atlikus perskaičiavimą priklausomai nuo mėginio temperatūros (lentelių 2–3 ir 2–4 grafos). Matome, kad, didėjant pieno specifiniam elektriniam laidumui, užšalimo temperatūra žemėja. Apskaičiuavus

specifinį elektrinį laidumą, ši priklausomybė tampa tiesiškesnė. 9 pav. pavaizduota pamatiniu krioskopiniu metodu nustatytos ir apskaičiuotos užšalimo temperatūros santykis (1 kreivė – ideali, 2 kreivė – eksperimento rezultatas). Kaip matome, toje kreivės dalyje, kur užšalimo temperatūra aukštesnė nei $T_{opt} = -0,523$ °C (piene yra pašalinio vandens, kai užšalimo temperatūra aukštesnė nei $-0,520$ °C), priklausomybė yra tiesinė, 1 ir 2 kreivės beveik sutampa, nustatymo paklaida maža ($\sim 0,0015$ °C). Dalyje, kur užšalimo temperatūra aukštesnė, kreivės išsiskiria ir rodo didesnę paklaidą (iki $0,003$ °C).

Išvados

1. Atliktas eksperimentas su 100 mėginių įrodė tiriamojo mėginio temperatūros įtaką, o kartu ir specifinio elektrinio laidumo įvertinimo svarbą rezultatų tikslumui. Eksperimento metu nustatytas temperatūrinis pokyčio koeficientas $\alpha = 0,015$ °C⁻¹.

2. Įrodyta, kad specifinis elektrinis laidumas bei temperatūriniai pokyčiai priklauso nuo pieno mėginiuose esančio pašalinio vandens. Galima daryti išvadą, kad užšalimo temperatūros nustatymo paklaida, kai piene nėra pašalinio vandens, yra du kartus didesnė ir siekia $0,003$ °C, nei tada, kai piene yra pašalinio vandens (6, 9 pav.).

Literatūra

1. **NEN3461, 1982.** Milk – Determination of the freezing-point with a thermistor cryoscope (routine method).
2. **Knyš A., Daunoras J., Sadzevičius J.** Matavimo metodo informacinis modelis pieno užšalimo temperatūrai nustatyti // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 6(41). – P. 36–39.
3. **Daunoras J., Knyš A., Sadzevičius J.** Elektroninės sistemos skystai terpei tirti matematinis modelis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 2(51). – P. 59–63.
4. **Koops J., Kerkhof Mogot M.F., van Hemert H.** Routine testing of farm milk by infra-red analysis // Neth. Milk Dairy J. – 989. – 43. – P.3.
5. **Prentice J.H. J.** Dairy Res. – 1972. – 39. – 275 p.
6. **Biggs D.A.** Instrumental infrared estimation of Fat, Protein and Lactose in milk: Evaluation of Multispec Instrument // J. Assoc. Off. Anal. Chem. – 1979. – 62(3). – P. 1202–1207.
7. **Light T. S. and Licht S. L.** Conductivity and Resistivity of Water from the Melting to Critical Points // Analytical Chemistry. – Vol. 59, Oct. 1987. – P. 2327-2330.

Pateikta spaudai 2005 04 04

J. Daunoras, A. Knyš. Skysčių specifinio elektrinio laidumo nustatymas ir jo kompensavimo sistema // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 7(63). – P. 44–48.

Nagrinėjamas pieno specifinio elektrinio laidumo nustatymas ir užšalimo temperatūros prognozės tikslinimas atsižvelgiant į mėginio temperatūrą. Apžvelgiamas pieno užšalimo temperatūros nustatymas remiantis pieno sudėties rodikliais (riebalų, baltymų, laktozės kiekiu piene) bei specifiniu elektriniu laidumu. Analizuojama specifinio elektrinio laidumo priklausomybė nuo mėginio temperatūros, tyrimo schema, pateikiami eksperimentiniai šios priklausomybės parametrai. Modeliuojami užšalimo temperatūros prognozės rezultatų pokyčiai keičiantis mėginio temperatūrai, pateikta modelio schema. Pateikiama sistemos, kuri įvertina mėginio temperatūrą, eksperimentiniai tyrimo duomenys ir jų analizė. Il.9, bibl.7 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

J. Daunoras, A. Knyš. Estimation of Conductivity in Liquids and a System to Compensate it // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 7(63). – P. 44–48.

In this paper an estimation of milk conductivity and correction of prediction of milk freezing point is discussed. A method of milk freezing point prediction according to milk quantitative analysis (contents of fat, proteins and lactose in milk) and conductivity is surveyed. The reliance between milk conductivity and temperature of the sample is analyzed. The experimental schematics and results are presented. The dependence of prediction of milk freezing point and the temperature of the sample is simulated, the modeling schematics is presented. The experimental data of the system for prediction of milk freezing point with compensation for the sample temperature changes and data analysis are presented. Ill.9, bibl.7 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

Й. Даунорас, А. Кныш. Электронная система для определения температуры замерзания молока // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. - № 7(63). – С. 44–48.

Представлены результаты измерения специфической электрической проводимости молока и уточнения прогноза температуры замерзания молока. Представлен обзор прогноза температуры замерзания молока, основанный на измерении составляющих молока (количества жира, белков и лактозы в молоке) и специфической электрической проводимости. Анализируется влияние температуры образца на результат измерения специфической электрической проводимости, схема анализа, представлены экспериментальные данные. Моделируются изменения результата прогноза температуры замерзания молока, представлена схема модели. Представлены экспериментальные данные системы, в которой учитываются изменения температуры образца, их анализ. Ил.9, табл.3, библи.7 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).