TÁBIYIY HÁM TEXNIKALÍQ ILIMLER
Fizika-matematika. Texnika. Informatika

СУЮҚ МАҲСУЛОТЛАР СИФАТ КЎРСАТКИЧЛАРИНИ НАЗОРАТ ҚИЛИШ УЧУН АДАПТИВ СИҒИМЛИ ДАТЧИК ВА ЎЛЧАШ ТИЗИМИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

Эшмурадов Дилшод Эльмурадович – *техника фанлари номзоди, доцент*
e_dilshod69@mail.ru
Низомов Норхужа Баходирович – *ассистент ўқитувчи*
nizomovnorxuja@gmail.com
Исмаилов Отабек Мирхалилович – *техника фанлари доктори (DSc), профессор*
ismoilovotabek2023@gmail.com
Тошкент ахборот технологиялари университети

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ

Эшмурадов Дилшод Эльмурадович – *кандидат технических наук, доцент*
Низомов Норхужа Баходирович – *ассистент преподаватель*
Исмаилов Отабек Мирхалилович *– доктор технических наук (DSc), профессор*
Ташкентский университет информационных технологий

MATHEMATICAL MODELING OF AN ADAPTIVE CAPACITIVE SENSOR AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING THE QUALITY INDICATORS OF LIQUID PRODUCTS

Eshmuradov Dilshod Elmuradovich – *Candidate of Technical Sciences*
Nizomov Norkhuja Bahodirovich – *assistant teacher*
Ismailov Otabek Mirkhalilovich – *Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor*
Tashkent University of Information Technologies

Таянч сўзлар: адаптив сиғимли датчик, диэлектрик сингдирувчанлик, суюқ маҳсулотлар сифати, паразит сиғим, ҳарорат компенсацияси, микроконтроллерли ўлчаш тизими, математик моделлаштириш.

Резюме. Мақолада суюқ маҳсулотлар, жумладан автомобиль ёқилғиси ва техник мойларнинг сифат кўрсаткичларини диэлектрик сингдирувчанлик ўзгариши асосида баҳолашга мўлжалланган адаптив сиғимли датчик ва микроконтроллерли ўлчаш тизимининг математик модели ишлаб чиқилган. Моделда ўта кичик сиғимларни ўлчашга таъсир этувчи паразит сиғимлар, ҳарорат ўзгариши ва электрон элементлар параметрларининг дрейфи ҳисобга олинган. Ҳарорат ва паразит сиғимлар таъсирини автоматик компенсация қилувчи адаптив алгоритм таклиф этилган. Компьютер симуляцияси натижаларига кўра, алгоритм статик характеристиканинг ночизиқлилик хатосини 2,1% дан 0,35% гача, ҳарорат дрейфини эса 0,08 дан 0,01 %/°C гача камайтиради.

Ключевые слова: адаптивный емкостный датчик, диэлектрическая проницаемость, качество жидких продуктов, паразитная емкость, температурная компенсация, микроконтроллерная измерительная система, математическое моделирование.

Резюме. В статье разработана математическая модель адаптивного емкостного датчика и микроконтроллерной измерительной системы, предназначенных для оценки показателей качества жидких продуктов, в том числе автомобильного топлива и технических масел, по изменению диэлектрической проницаемости. В модели учтены паразитные емкости, влияющие на измерение сверхмалых емкостей, изменение температуры и дрейф параметров электронных элементов. Предложен адаптивный алгоритм автоматической компенсации влияния температуры и паразитных емкостей. По результатам компьютерного моделирования алгоритм снижает погрешность нелинейности статической характеристики с 2,1 до 0,35 %, а температурный дрейф – с 0,08 до 0,01 %/°C.

Key words: adaptive capacitive sensor, dielectric permittivity, liquid product quality, parasitic capacitance, temperature compensation, microcontroller-based measurement system, mathematical modeling.

Summary. The paper presents a mathematical model of an adaptive capacitive sensor and a microcontroller-based measurement system designed to assess the quality indicators of liquid products, including automotive fuel and technical oils, from changes in their dielectric permittivity. The model accounts for the parasitic capacitances affecting the measurement of ultra-small capacitances, temperature variations and the parameter drift of electronic components. An adaptive algorithm for automatic compensation of temperature and parasitic-capacitance effects is proposed. Computer simulation shows that the algorithm reduces the nonlinearity error of the static characteristic from 2.1 % to 0.35 % and the temperature drift from 0.08 to 0.01 %/°C.

Кириш. Суюқ маҳсулотлар – автомобиль ёқилғиси, техник мойлар ва технологик суюқликларнинг сифат кўрсаткичларини тезкор ва узлуксиз назорат қилиш ўлчаш техникаси ва метрологиянинг долзарб масалаларидан биридир. Уларнинг намлиги ва ифлосланиш даражасидаги ўзгаришлар техника воситаларининг ишончлилиги ва экологик хавфсизлигига бевосита таъсир қилади, уларни назорат қилиш эса меъёрий талаблар билан белгиланган [17]. Бу ўзгаришлар суюқликнинг диэлектрик сингдирувчанлигида акс этгани сабабли сиғимли ўлчаш усуллари мазкур муаммони ҳал этишнинг истиқболли йўналиши ҳисобланади.

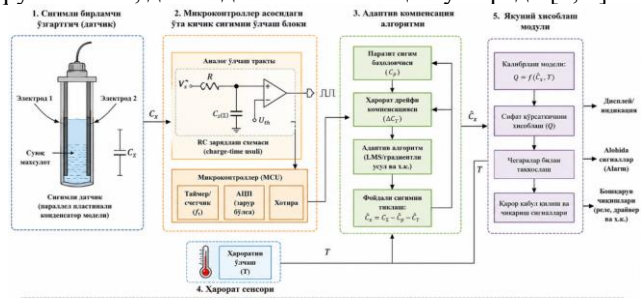
Бироқ фойдали сиғим ўзгариши кўп ҳолларда пикофарад улушлари даражасида бўлиб, уланиш кабеллари, босма плата ўтказгичлари ва электродларнинг чекка майдони ҳосил қиладиган паразит сиғимлар билан таққосланади. Бу нол нуқтасининг силжиши ва статик тавсифнинг ночизиқлилигига олиб келади. Ҳарорат

ўзгариши эса суюқлик хусусиятлари ва электрон трактга таъсир этиб, чиқиш сигналида дрейф ҳосил қилади. Тадқиқотнинг мақсади – ушбу таъсирларни адаптив компенсация қилувчи сиғимли ўлчаш тизимининг математик моделини ишлаб чиқишдир.

Адабиётлар шарҳи. Ўта кичик сиғимларни рақамли кодга айлантириш усуллари [1] ва суюқлик сатҳини сиғимли-рақамли ўзгартгичлар ёрдамида ўлчаш [2] ишларида ёритилган. Зарядланиш вақтига асосланган ўлчаш усулининг (CTMU) микроконтроллерли амалга оширилиши [3, 4, 10] да тавсифланган. Датчикларнинг ҳарорат хатоларини компенсациялаш учун адаптив ҳарорат компенсацияси моделлари [11], ҳарорат дрейфини компенсациялаш алгоритмлари [12], ночизиқлилик компенсацияси тизимлари [13] ва сиғимли датчик дрейфининг адаптив ночизиқли модели [14] таклиф этилган; ўлчаш маълумотларига моделга асосланган интеллектуал ишлов бериш бошқа соҳаларда ҳам самарали қўлланилмоқда [15]. Бироқ ушбу ишларда ўта кичик сиғимларни ўлчаш, паразит ва ҳарорат таъсирини бирлаштирилган адаптив компенсациялаш ҳамда натижани сифат кўрсаткичига айлантириш реал вақтда ишловчи ягона тизимга бирлаштирилмаган.

Методология. Таклиф этилаётган тизим суюқ муҳит диэлектрик хусусиятларининг ўзгаришини датчик электр сиғимининг ўзгаришига айлантириш тамойилига асосланади [1, 2]. Тизимнинг структуравий-функционал схемаси 1-расмда келтирилган.

Тизим бешта асосий блокдан иборат: сиғимли бирламчи ўзгартгич (Сх), микроконтроллер асосидаги ўта кичик сиғимларни ўлчаш блоки, ҳарорат сенсори, паразит сиғимлар ва ҳарорат таъсирини ҳисобга олувчи адаптив компенсация алгоритми ҳамда натижани сифат кўрсаткичига айлантирувчи якуний ҳисоблаш модули. Суюқликнинг таркиби, намлиги ёки ифлосланиш даражаси ўзгарганда унинг нисбий диэлектрик сингдирувчанлиги, демак датчик сиғими ҳам ўзгаради [5, 6].



1-расм. Суюқ маҳсулотлар сифат кўрсаткичларини назорат қилишга мўлжалланган адаптив ўлчаш тизимининг структуравий-функционал схемаси

Параллел пластинали конденсатор моделида датчикнинг электр сиғими қуйидагича аниқланади:

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (1)$$

бу ерда C_x – датчикнинг назорат қилинаётган муҳит таъсирида шаклланувчи фойдали электр сиғими, Ф; $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – вакуумнинг диэлектрик доимийси; ε_r – суюқ маҳсулотнинг нисбий диэлектрик сингдирувчанлиги; S – электродларнинг самарали юзаси, м²; d – электродлар орасидаги масофа, м.

Датчикнинг конструктив параметрлари S ва d ўзгармас деб қабул қилинса, (1) ифодага мувофиқ унинг электр сиғими суюқ муҳитнинг нисбий диэлектрик сингдирувчанлигига тўғри пропорционал бўлади. Шу сабабли датчик сиғимидаги ўзгариш қуйидагича ифодаланади:

$$\Delta C_x = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \Delta \varepsilon_r \quad (2)$$

бу ерда ΔC_x – суюқ маҳсулот хусусиятларининг ўзгариши натижасида датчик сиғимининг ўзгариши; $\Delta \varepsilon_r$ – нисбий диэлектрик сингдирувчанликнинг бошланғич қийматга нисбатан ўзгариши.

Бундан датчикнинг диэлектрик сингдирувчанликка нисбатан сезгирлиги келиб чиқади:

$$K_\varepsilon = \frac{\partial C_x}{\partial \varepsilon_r} = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (3)$$

бу ерда K_ε – датчик сиғимининг суюқ муҳит нисбий диэлектрик сингдирувчанлигига нисбатан сезгирлик коэффициенти, Ф.

Реал конструкцияда электродларнинг чекка майдони, уланиш кабеллари ва босма плата ўтказгичлари қўшимча паразит сиғимлар ҳосил қилади, шу сабабли ўлчаш канали киришидаги умумий сиғим қуйидаги аддитив модел билан ифодаланади [2, 7]:

$$C_\Sigma = C_x + C_p + C_w + C_e + \Delta C_T + \Delta C_n \quad (4)$$

бу ерда C_Σ – ўлчаш блоки томонидан қайд этиладиган умумий сиғим; C_p – датчик конструкцияси ва электродларнинг чекка электр майдони билан боғлиқ паразит сиғим; C_w – уланиш симлари ва кабелларнинг сиғими; C_e – электрон ўлчаш тракти киришининг эквивалент сиғими; ΔC_T – ҳарорат ўзгариши натижасида юзага келувчи сиғим дрейфи; ΔC_n – электромагнит халақитлар ва тасодифий шовқинлар таъсирида ҳосил бўлувчи ўзгарувчан ташкил этувчи.

Паразит сиғимлар фойдали сиғим билан таққосланадиган даражада бўлиши мумкин, шу боис экранлаш, дифференциал ўлчаш, аппарат калибрлаш ва дастурий компенсация усулларини биргаликда қўллаш мақсадга мувофиқ [7-9].

CΣ сиғимни рақамли кодга айлантириш учун зарядланиш вақтига асосланган RC-ўлчаш усули қабул қилинган: датчик эталон R қаршилик орқали Us манбадан зарядланади ва кучланиш Uth чегарага етгунча ўтган вақт микроконтроллер таймерида N код кўринишида қайд этилади [3, 10].

Ҳарорат сенсори суюқлик ва ўлчаш трактининг жорий T ҳароратини қайд этади [16]. Сиғимнинг ҳароратга боғлиқ ўзгариши биринчи яқинлашувда чизиқли модел билан ифодаланади:

$$\Delta C_T = C_0 \alpha_C (T - T_0) \quad (5)$$

бу ерда $C_0 - T_0$ таянч ҳароратдаги датчик сиғими, Ф; α_C – датчик ва ўлчаш трактининг умумлаштирилган ҳарорат коэффициенти, °C⁻ ¹; T – жорий ҳарорат, °C; T_0 – калибрлаш амалга оширилган таянч ҳарорат, °C.

Адаптив алгоритм ўлчанган умумий сиғимдан паразит ва ҳарорат ташкил этувчиларининг баҳоларини айириш орқали фойдали сиғимни тиклайди:

$$\hat{C}_x(k) = \bar{C}_\Sigma(k) - \hat{C}_p(k) - \Delta\hat{C}_T(k) \quad (6)$$

бу ерда $\hat{C}_x(k)$ – k-ўлчаш циклида датчик фойдали сиғимининг баҳоланган қиймати; $\bar{C}_\Sigma(k)$ – фильтрланган умумий сиғим; $\hat{C}_p(k)$ – паразит сиғимнинг жорий баҳоси; $\Delta\hat{C}_T(k)$ – ҳарорат таъсиридан ҳосил бўлган сиғим ўзгаришининг баҳоси.

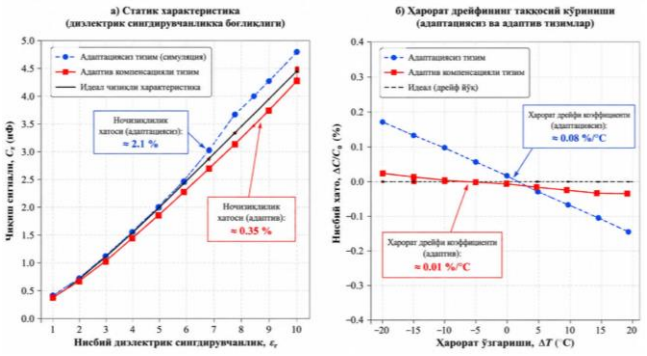
Компенсацияланган $\hat{C}_x$ қиймати якуний ҳисоблаш модулига узатилади. Ушбу модул экспериментал калибрлаш натижасида олинган функционал боғланиш

асосида датчик сиғимини назорат қилинаётган суюқ маҳсулотнинг шартли сифат кўрсаткичига айлантиради:

$$Q = f(\hat{C}_x, T) \quad (7)$$

бу ерда Q – суюқ маҳсулотнинг баҳоланаётган сифат кўрсаткичи; $f(\cdot)$ экспериментал калибрлаш орқали аниқланадиган ўзгартириш функцияси.

Таҳлил ва натижалар. Тизим хусусиятлари компьютер симуляцияси ёрдамида баҳоланди; εr, ҳарорат, паразит сиғим, шовқин ва мослашиш тезлиги коэффициенти ўзгарувчан параметрлар сифатида олинди (2-расм).



2-расм. Адаптив сиғимли ўлчаш тизимининг симуляция натижалари:

а) – чиқиш сигналининг суюқ муҳит нисбий диэлектрик сингдирувчанлигига боғлиқ статик характеристикаси;

б) – адаптив компенсацияли ва компенсациясиз тизимларда ҳарорат дрейфининг таққосий кўриниши.

Идеал ҳолатда компенсацияланган чиқиш сиғими Ĉx нинг εr га боғланиши (1) ифодага мувофиқ чизиқли бўлиши керак. 2а-расмга кўра, адаптив компенсациясиз тизимда статик характеристиканинг нисбий ночизиқлилик хатоси 2,1% ни, адаптив компенсация қўлланилганда эса 0,35% ни ташкил этди, яъни хато Knl = δnl,0 / δnl,α = 2,1 / 0,35 = 6,0 марта камайди. Бу натижа [11–13] ишлардаги хулосаларга мос келади. 2б-расмга кўра, ҳарорат дрейфи коэффициенти 0,08 %/°C дан 0,01 %/°C гача, яъни саккиз марта пасайди.

Муҳокама. Мослашиш тезлиги коэффициенти γ = 0,15 бўлганда тизимнинг барқарорлашув вақти 120 мс дан ошмади, бу уни реал вақт режимида қўллаш имконини беради. γ нинг кичик қийматларида алгоритм секин жавоб беради, катта қийматларида эса шовқинга сезгирлик ортади, шу боис γ = 0,15 мақбул ҳисобланади.

Тизимнинг амалий татбиқ йўналишларидан бири – муаллифлар томонидан ишлаб чиқилаётган D-50RXU автомобиль экономайзер қурилмаси. Датчикни ёқилғи тизимига интеграциялаш экономайзердан олдинги ва кейинги ёқилғи ҳолатини узлуксиз таққослаш имконини беради. Келгуси тадқиқотларда датчик прототипини калибрлаш ва тажриба стендида синаш режалаштирилмоқда.

Хулоса. Суюқ маҳсулотлар сифатини реал вақтда назорат қилиш учун адаптив сиғимли ўлчаш тизимининг математик модели ишлаб чиқилди. Таклиф этилган адаптив алгоритм статик характеристиканинг ночизиқлилик хатосини олти марта, ҳарорат дрейфини саккиз марта камайтиради. Датчик кўрсаткичларини ёқилғининг сифат параметрлари, жумладан октан сони билан ишончли боғлаш учун стандарт лаборатория таҳлиллари асосида экспериментал калибрлаш талаб этилади.

Адабиётлар

1. Texas Instruments. FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications. // Application Report SNOA927. – Texas Instruments, 2021.

2. Wang J. Liquid Level Sensing Using Capacitive-to-Digital Converters. // Analog Dialogue, 2015, V. 49, №4.– P. 1-3.

3. Bohn B. Microchip CTMU for Capacitive Touch Applications. Application Note AN1250. – Microchip Technology Inc., 2009.

4. Texas Instruments. CapTIvate Technology Guide: Charge Transfer Technology. MSP430 CapTIvate Design Center. – Texas Instruments, 2026.

5. Kim J.W., Pasupathy P., Zhang S., Neikirk D.P. Measurement of Liquid Complex Dielectric Constants Using Non-Contact Sensors. // IEEE SENSORS 2009 Conference, 2009. – P. 2017-2020.

6. Matko V., Milanović M. Sensitivity and Accuracy of Dielectric Measurements of Liquids Significantly Improved by Coupled Capacitive-Dependent Quartz Crystal. // Sensors, 2021, Vol. 21, № 10. – Art. 3565.

7. Pratt S. Layout Guidelines for the AD7147 and AD7148 CapTouch Controllers. Application Note AN-957. – Analog Devices.

8. Analog Devices. AD7745/AD7746: 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. Data Sheet, Rev. 0. – Analog Devices, 2005.

9. Analog Devices. AD7747: 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. Data Sheet, Rev. 0. – Analog Devices, 2007.

10. Microchip Technology. Charge Time Measurement Unit (CTMU). Family Reference Manual, Section 37. – Microchip Technology Inc.

11. Xu W., Feng X., Xing H. Modeling and Analysis of Adaptive Temperature Compensation for Humidity Sensors.э // Electronics, 2019, Vol. 8, № 4. – Art. 425.

12. Feng Y., Li X., Zhang X. An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter. // Sensors, 2015, Vol. 15, № 5. –P. 11222-11238.

13. Chen G., Zhou S., Ni J., Huang H. Adaptive Nonlinearity Compensation System for Integrated Temperature and Moisture Sensor. // Micromachines, 2019, Vol. 10, № 12. – Art. 878.

14. Han Z., Hong L., Meng J., Li Y., Gao Q. Temperature Drift Modeling and Compensation of Capacitive Accelerometer Based on AGA-BP Neural Network. // Measurement, 2020, Vol. 164. – Art. 108019.

15. Ziyadullaev D. et al. Soil fertility evaluation based on the Sugeno fuzzy logical model. // BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023, Vol. 67. – Art. 01001.

16. Айтбаев Т.А., Абдурахманов А.А., Эшмурадов Д.Э. Анализ характеристик существующих конструкций и выработка требований к термодатчику. // Теория и практика современной науки, 2021, № 1 (67). – С. 19-26.

17. Eshmuradov D. et al. Standartlashtirish, sertifikatlash va sifatni boshqarish tizimlari sohasidagi me'yoriy hujjatlar. // Science and innovation, 2022, Vol. 1, № A8. – P. 595-600.