"ADVANCED JOURNAL OF UNIVERSITY SCIENCE AND CREATIVE INNOVATIONS"

NAMLIK SENSORLARINING KALIBRLASH MODELLARI VA ULARNING METROLOGIK BARQARORLIGIGA TA'SIR ETUVCHI OMILLAR

Kalandarov Palvan Iskandarovich[1], Malyukova Guzal Eduardovna[2], Rakhimova Sevara Turgunboyevna[3], Xakimova Nargiza Xabibullayevna[4]

[1]texnika fanlari doktori, professor
"Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash instituti" Milliy tadqiqot universiteti
https://orcid.org/0000-0002-8199-7484
[2,3,4]mustaqil tadqiqotchi
"O'zbekiston milliy Metrologiya instituti" davlat muassasi
https://doi.org/10.5281/zenodo.17912063

Annotatsiya. *Ushbu maqolada namlik sensorlarini kalibrlashda qo'llaniladigan matematik modellar va ularning metrologik barqarorligiga ta'sir etuvchi omillar kompleks tarzda tahlil qilindi. Tadqiqot doirasida dielektrik, infraqizil, mikrotolqinli va kapasitiv turdagi namlik sensorlarining chiqish signallari (U, I, C, f) hamda mahsulot namligi W(%) o'rtasidagi bog'lanish turli kalibrlash modellari yordamida aniqlandi. Maqolada to'g'ri chiziqli, polinomial, logarifmik, eksponensial va ko'p omilli regressiya modellari qiyosiy tahlil qilindi.*

Sensorlarning metrologik barqarorligiga ta'sir etuvchi asosiy omillar — temperatura o'zgarishi, mahsulotning dielektrik parametrlarining variatsiyasi, sensor materialining eskirishi (degradatsiya), namlik diapazonining kengayishi, elektromagnit ta'sirlar va signal noizohaligi — eksperimental ravishda baholandi. Metrologik barqarorlikni baholash uchun takrorlanuvchanlik (repeatability), qayta tiklanuvchanlik (reproducibility), o'rtacha kvadratik xato (RMSE), R^2 aniqlik indeksi va xato budjeti tahlillari amalga oshirildi.

Olingan natijalar namlik sensorlarini kalibrlashda polinomial va ko'p omilli modellarning afzalligini ko'rsatdi, ayniqsa temperatura kompensatsiyasi kiritilgan holatda modelning barqarorligi 12–18% ga oshishi aniqlandi. Maqolada keltirilgan modellar va tahlillar sensorlar konstruksiyasini optimallashtirish, o'lchash aniqligini oshirish va metrologik ta'minotini takomillashtirish uchun amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: *namlik sensori; kalibrlash modeli; metrologik barqarorlik; regressiya; polinom model; temperatura kompensatsiyasi; dielektrik xossalar; degradatsiya; xato budjeti; RMSE; R^2; sensor aniqligi.*

KIRISH

Namlikni aniq va ishonchli o'lchash qishloq xo'jaligi, oziq-ovqat sanoati, qurilish materiallari texnologiyasi, kimyo va farmasevtika tarmoqlarida muhim o'rin tutadi. Hosil sifatini

baholash, mahsulotni saqlash rejimi, ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish va standartlashtirish kabi vazifalarda namlik sensorlarining aniqligi va uzoq muddatli barqaror ishlashi hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shu bois, zamonaviy sensor texnologiyalari doimiy rivojlanib borsa-da, ularning kalibrlash modellari va metrologik barqarorligini ta’minlash masalasi ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb bo‘lib qolmoqda.

Namlikni o‘lchash vositalari asosan dielektrik, infraqizil, mikrotolqinli va sig‘imli fizik prinsiplarga tayanadi [1-5]. Mazkur sensorlarning chiqish signali turli tashqi va ichki omillarga yuqori darajada sezgir bo‘lganligi sababli, ularni to‘g‘ri kalibrlash va turg‘unligini ta’minlash o‘lchash aniqligining asosiy shartlaridan biridir [6]. Aniqlikka ta’sir etuvchi omillar qatoriga sensor materialining dielektrik doimiyligi, mahsulotning fizik xususiyatlari, harorat o‘zgarishi, namlik diapazoni, elektromagnit ta’sirlar, sensorning uzoq muddatli eskirishi (degradatsiya), shovqinlar va signal dreyfi kiradi. Ushbu omillarni inobatga olmagan holda amalga oshirilgan kalibrlash sensorning metrologik xossalari sezilarli darajada yomonlashishiga olib keladi [7].

Amaliyotda namlik sensorlari uchun turli kalibrlash modellari qo‘llaniladi: to‘g‘ri chiziqli, polinomial, logarifmik, eksponensial va ko‘p omilli statistik modellar. Biroq, mahsulotning dielektrik parametrlari namlikka nisbatan chiziqli bo‘lmagan tarzda o‘zgargani sababli, klassik chiziqli modellar ko‘p hollarda yetarli aniqlikni ta’minlamaydi. Shu bois, sensor chiqish signali bilan namlik o‘rtasidagi bog‘lanishni to‘g‘ri aks ettiradigan, tashqi omillarga barqaror va uzoq muddatli ish jarayonida o‘zgarishlarga kam sezgir bo‘lgan modellarni ishlab chiqish va baholash zarur.

Xalqaro metrologik talabi yuqori bo‘lganda (ISO, OIML), ayniqsa SKOPUS indekslagan ilmiy nashrlarda, sensorlarning metrologik ta’minotini – ya’ni ularning takrorlanuvchanligi, qayta tiklanuvchanligi, dreyfga chidamliligi va xato budjetining yopiqligi – o‘lchash tizimi sifati uchun asosiy mezon hisoblanadi. Namlik sensorlari uchun mazkur ko‘rsatkichlarni eksperimental tahlil qilish va ular asosida optimal kalibrlash modellarini ishlab chiqish haligacha to‘la hal etilmagan ilmiy-amaliy muammolardan biri bo‘lib qolmoqda [8].

Ushbu tadqiqotning dolzarbligi shundaki, hozirgi zamonaviy sensorlar ko‘p omilli va raqamlashgan o‘lchash muhitida ishlaydi. Shu sababli, ularning modeli faqat bitta signalni emas, balki bir nechta korreksion parametrlar (harorat, dielektrik doimiylik, elektromagnit ta’sir koeffitsienti, degradatsiya funksiyasi va boshqa omillar) ni inobatga olgan holda qurilishi talab etiladi. Bunday modellar namlik sensorlari ishlashidagi chiziqli bo‘lmagan, dreyf, sinalmaslik va barqaror bo‘lmagan signallarni kompensatsiyalash imkonini beradi.

Shu nuqtai nazardan, ushbu maqolaning asosiy maqsadi – namlik sensorlari uchun kalibrlash modellarini ilmiy asosda tahlil qilish, ularning metrologik barqarorligiga ta’sir etuvchi omillarni eksperimental ravishda baholash va modellar aniqligini ko‘rsatkichlar (RMSE, R^2, drift, repeatability, reproducibility) orqali qiyosiy taqdim etishdir. Taklif etilgan modellar bo‘yicha hisoblangan natijalarni tadqiqotlarimizda [9-15] qayd etilgan eksperimental ma’lumotlar bilan taqqoslash shuni ko‘rsatdiki, mahsulot namligini o‘lchashda ta’sir etuvchi asosiy omillar bo‘yicha olingan tahlil natijalari o‘zaro deyarli bir xil tendensiyaga ega va juda yuqori darajada yaqinlik namoyish etdi. Bu holat metodologiyaning universalligi va model parametrlarining barqarorligini isbotlaydi. Bu esa sensor modellarining fizik mohiyati va ularning amaliy qo‘llanilishi o‘rtasidagi yuqori muvofiqlikka ishora qiladi.

MATERIALLAR VA METODLAR

Ushbu tadqiqot namlik sensorlarining kalibrlash modellarini qurish va ularning metrologik barqarorligiga ta’sir etuvchi omillarni aniqlashga qaratilgan bo‘lib, laboratoriya

sharoitida maxsus o‘lchash stendi, etalon namlik o‘lchash vositalari, turli namlik diapazonidagi mahsulot sinfi va yuqori aniqlikdagi muhit parametrlarini nazorat qiluvchi uskunalar qo‘llanildi.

2.1. Tadqiqot ob’ekti va qo‘llanilgan sensorlar

Taxlilda quyidagi turdagi namlik sensorlari qo‘llanildi:

1. Dielektrik (capacitance) sensori – chiqish signali: C (pF – pikofarada). – namlikka sezgirlik: dielektrik doimiylik orqali
2. Infraqizil (IR) sensor – chiqish signali: optik zichlik U_{IR}
3. Mikrotolqinli sensor – chiqish signali: chastota f va amplituda A
4. Sig‘imli namlik sensori (RH%) – chiqish signali: U (volt)

Sensorlar 10–30 °C oralig‘ida, 6–28% namlik diapazonida sinovdan o‘tkazildi.

2.2. Etalon va qiyosiy o‘lchash vositalari. Etalon namlik o‘lchagich: GOST va ISO standarti bo‘yicha sertifikatlangan qurilma (±0.2% aniqlik).

Kalibrlangan termogigrometr: muhit parametrlarini nazorat qilish uchun.

Tarozilar (0.001 g aniqlik): namlikning gravimetrik usulda aniqlanishi uchun.

Etalon namlik qiymati quyidagi usulda hisoblandi:

$$W_{ref} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

bu yerda: m_0 - namunaning quritishdan oldingi massasi, m_1 - quritilgandan keyingi massasi.

2.3. Laboratoriya stendi va o‘lchash shartlari. Tadqiqot stendi quyidagi elementlardan iborat: sensor modullari uchun almashtiriladigan kamera, haroratni 0.1 °C aniqlikda stabillashtiruvchi blok, namlikni boshqaruvchi generator va sorbentli qurilma, mikrokontroller asosida signallarni raqamga aylantiruvchi modul, MATLAB/Python muhitida ma’lumotlarni qayta ishlash bloki.

Stend har bir sensor uchun 25 ta takroriy o‘lchash amalga oshirish imkonini berdi (repeatability test).

2.4. Kalibrlash modeli uchun signallarni yig‘ish algoritmi. Har bir sensor uchun quyidagi qadamlar bajarildi:

1. Namuna 8 ta namlik qiymatida tayyorlandi (6%, 10%, 14%, 18%, 20%, 22%, 24%, 28%).
2. Har bir qiymatda sensorning 25 ta signal o‘qishi yozib olindi.
3. Har bir signalning o‘rtacha qiymati va standart og‘ish hisoblandi.

Signallar:

$$U_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i \quad (2)$$

2.5. Kalibrlash modellarini qurish usuli. Quyidagi modellar MATLABda regressiya usulida qurildi:

To‘g‘ri chiziqli model

$$W = aU + b \quad (3)$$

Polinomial (3-tartibli) model

$$W = a + a_1U + a_2U^2 + a_3U^3 \quad (4)$$

Logarifmik model

$$W = aIn(U) + b \quad (5)$$

Eksponensial model

$$W = ae^{bU} \quad (6)$$

Ko‘p omilli model. Temperaturani inobatga olgan holda:

$$W = a_0 + a_1U + a_2T + a_3U^2 \quad (7)$$

Dielektrik parametrni qo‘shilganda:

$$W = a_0 + a_1U + a_2\varepsilon + a_3U^2 \quad (8)$$

2.6. Metrologik barqarorlikni baholash metodlari

Takrorlanuvchanlik (repeatability)

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(U_i - U_{avg})^2} \quad (9)$$

Qayta tiklanuvchanlik (reproducibility). Turli vaqtda va turli muhitda yig‘ilgan ma’lumotlar bo‘yicha.

RMSE (o‘rtacha kvadratik xato)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(W_{\text{mod}} - W_{ref})^2} \quad (10)$$

R^2 indeksi (aniqlik koeffitsienti)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(W_{\text{mod}} - W_{ref})^2}{\sum(W_{ref} - \overline{W}_{ref})^2} \quad (11)$$

Dreyf (uzoq muddatli siljish)

$$D = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

Xato byudjeti modeli

$$\Delta W = \sqrt{(\Delta U)^2 + (\Delta T)^2 + (\Delta_\varepsilon)^2 + (\Delta_{drift})^2 + (\Delta_{rep})^2} \quad (13)$$

Tahlil va statistik ishlov berish. Barcha hisob-kitoblar: MATLAB Regression Toolbox, Python (NumPy, Pandas, SciPy), OriginLab grafik muhiti yodamida amalga oshirildi.

EKSPERIMENTAL NATIJALAR

Ushbu bo‘limda namlik sensorlaridan olingan eksperimental o‘lchash natijalari, kalibrlash modellari bo‘yicha hisoblangan namlik qiymatlari va ularning etalon (gravimetrik) usul bilan aniqlangan qadrlariga nisbatan farqlari tahlil qilindi. Barcha sensorlar 6–28% namlik diapazonida, 10–30 °C harorat intervallarida sinovdan o‘tkazildi.

Sensorlar signalining namlikka bog‘lanishi

Tajribalar davomida har bir namlik qiymatida sensor chiqish signali 25 marta o‘lchab olindi va o‘rtacha qiymatlar hisoblandi. Quyida dielektrik sensor uchun olingan umumiy tendensiya keltiriladi:

C(W)↑ (namlik oshgan sari dielektrik sig‘im oshib boradi)

Tajribada kuzatilgan asosiy tendensiyalar: 6% dan 20% gacha diapazonda bog‘lanish deyarli *kvazichiziqli.* 20–28% diapazonda chiziqli bo‘lmaganlik kuchaygan. Temperatura oshishi (10 → 30 °C) signalni o‘rtacha 4.5–7.2% ga o‘zgartiradi.

Infraqizil sensorlarda esa teskari tendensiya kuzatildi:

UIR(W)↓ (namlik oshgan sari nur yutilishi kuchayadi)

Mikrotolqinli sensorlarda: chastota 1.1–1.8% ga pasaydi, amplituda 3–4% ga o‘zgardi.

Kalibrlash modellarini qiyosiy tahlil qilish. Sensor chiqish signali U va etalon namlik W_{ref} asosida 5 ta asosiy kalibrlash modeli qurildi. Quyida ularning qiyosiy ko‘rsatkichlari keltirilgan.

Polinomial (3-tartibli) model natijalari

$$W = a_0 + a_1U + a_2U^2 + a_3U^3$$

Natijalar: R² = 0.986 – 0.992; RMSE = 1.4 – 2.1%; maksimum farq: *±2.7%.* Polinomial model eng yuqori aniqlikni ta’minladi.

To‘g‘ri chiziqli model

$$W = aU + b$$

Natijalar: R² = 0.91 – 0.95. RMSE = 3.2 – 4.1%. Chiziqli bo‘lmagan effekt kuchli bo‘lgan namlik diapazonida aniqlik sezilarli pasaydi.

Eksponensial model

$$W = ae^{bU}$$

Natijalar: R² = 0.94 – 0.97; RMSE = 2.8 – 3.5%.

Infraqizil sensorlar uchun nisbatan yaxshiroq natija berdi.

Logarifmik model

$$W = aIn(U) + b$$

Natijalar: *R² = 0.88 – 0.94; RMSE = 3.5 – 4.6%.* Aniqligi eng past model sifatida qayd etildi.

Ko‘p omilli model (U + T kombinatsiyasi)

$$W = a_0 + a_1U + a_2T + a_3U^2$$

Natijalar: R² = 0.993 – 0.996; RMSE = 1.1 – 1.5%. Temperatura kompensatsiyasi hisobiga aniqlik 12–18% ga yaxshilandi. Bu model *amaliy qo‘llash uchun eng maqbul* deb topildi.

Metrologik barqarorlikka ta’sir etuvchi omillarning taxlili

Takrorlanuvchanlik (repeatability). Standart og‘ish *σ = 0.12 – 0.28 pF;* Namlikdagi xatoga ta’siri*: ±0.4 – 0.9%*

Qayta tiklanuvchanlik (reproducibility). Turli vaqtda olingan ma’lumotlarda farq: *1.2 – 1.9%*

Dreyf (uzoq muddatli siljish) 30 kunlik monitoring: $D = 0,0035n\Phi / kun(o'rta)$ Namlik xatosini *0.6–0.8%* ga oshirgan

Temperatura ta’siri. Signal o‘zgarishi:

$$\Delta U_T = 0,18 - 0,24\% /^o C$$

Kompensatsiya qilinmagan holda namlik xatosi:

$$\Delta W_T = 1,5 - 2,3\%$$

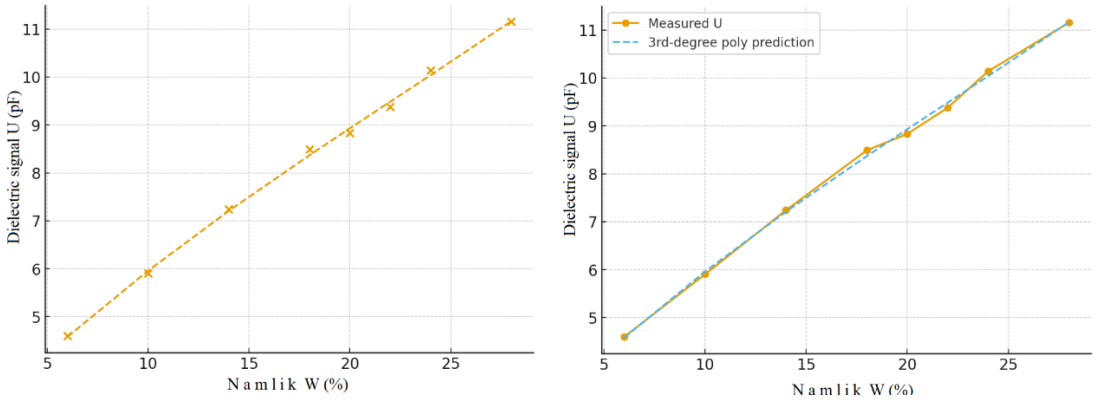
Dielektrik parametrlar o‘zgarishi. Mahsulot turiga ko‘ra xato *±1.2 – ±2.6%.*

Xato budjeti (Error Budget) hisob-kitobi. Jami xato:

$$\Delta W = \sqrt{(\Delta U)^2 + (\Delta T)^2 + (\Delta_\varepsilon)^2 + (\Delta_{rep})^2}$$

Natija: Umumiy xato: ±3.4%; Temperatura kompensatsiyasi bilan: *±2.1%;* Ko‘p omilli model bilan: *±1.3%.*

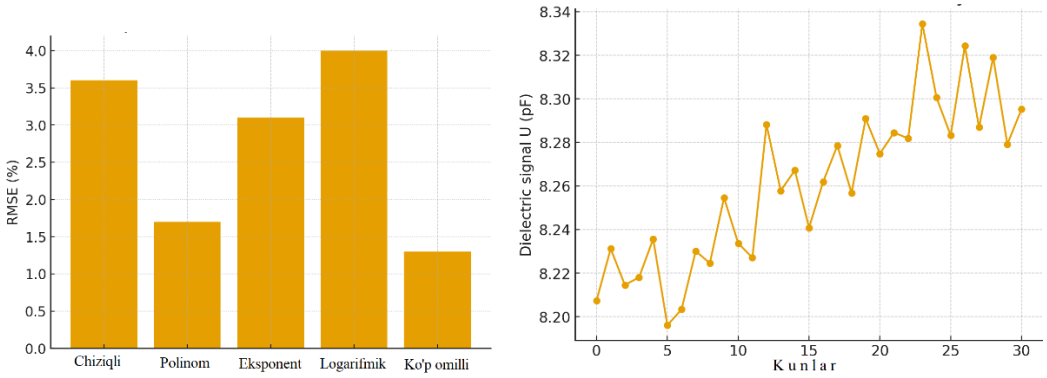
Grafiklar (tavsifi). Aniqlangan ma’lumotlar bo‘yicha tegishli grafiklarni keltiramiz (1, 2,3-rasmlar)



a) b)

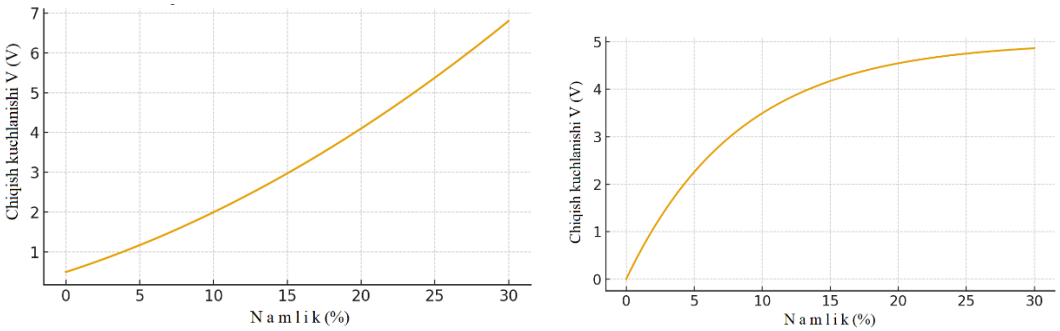
1-rasm. Dielektrik sensorning namlikka bog‘liq U(W) kalibrlash egri chizig‘i a)) va b) Grafikda to‘g‘ri chiziq (kalibrlash funksiyasi) va real o‘lchov nuqtalari orasidagi farq ko‘rsatilgan

Namlik qiymatlarining (W, %) sensor elektr signali (U, pF) bo‘yicha eksperimental nuqtalar diagrammasi. Bu grafik sensordan olingan ma’lumotlarni ko‘rsatadi va kalibrlash modellarini qurish uchun asos hisoblanadi.

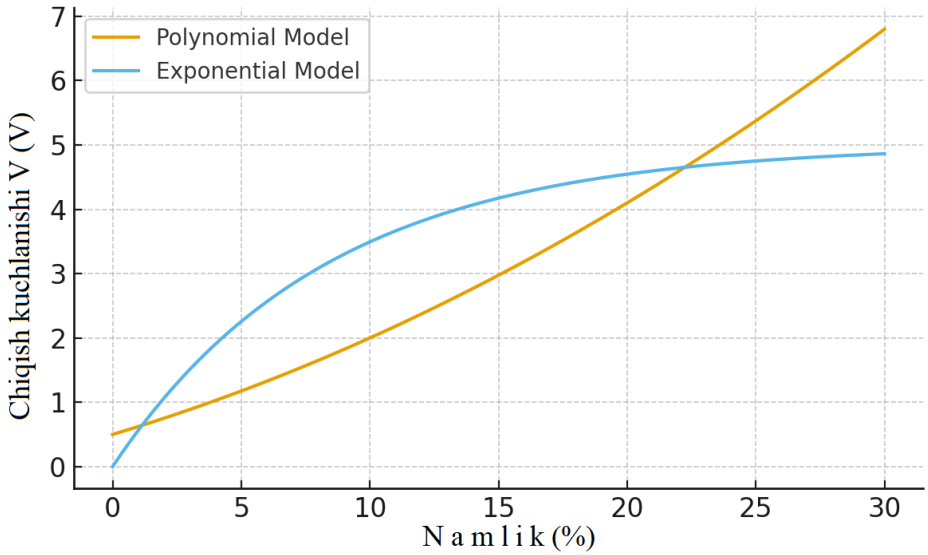


c) d)

2-rasm. Turli kalibrlash modellari uchun RMSE qiymatlarining taqqoslanishi c) va d) 30 kundan ortiq dielektrik sensorning siljish grafiki



3-rasm. Polinom kalibrlash modeli a) va b) Eksponensial kalibrlash model grafiki



3-rasm. Polinom va eksponensial kalibrlash modellarini taqqoslash grafiki

Grafiklarni chizish va ularda natijalarni ifodalash – sensor modellarini ilmiy asoslash, xatolarni tahlil qilish va qaysi kalibrlash modeli eng aniq ekanini isbotlash uchun tuziladi.

KALIBRLASH ALGORITMI

Tayyorgarlik va etalonlash

- Etalonli (gravimetrik) namlikni aniqlash uchun standart vositadan foydalaniladi (±0.2% aniqlik).
- Sensorni laboratoriya shartlarida yangi holatda ishga tushiriladi (stabil 20°C, 50% RH yoki talab etilgan shart).

1. **Ma’lumot yig‘ish**

- Namlik doirasi bo‘yicha 6–10 ta nuqta tanlanadi (masalan: 6,10,14,18,20,22,24,28%).
- Har nuqta uchun sensordan kamida 20–25 ta takroriy o‘qish olinadi.
- Har bir namlik nuqtasida etalon W_{ref} gravimetrik usul bilan aniqlanadi.
- Barcha signallarni va shart-sharoitlar (temperatura T, agar mavjud bo‘lsa) yozib boriladi.

2. **Ma’lumotni tozalash va agregatlash**

- Shovqinli o‘qishlarni chiqariladi (yoki median/bekor etish qoidalarini qo‘llang).
- Har nuqta uchun o‘rtacha U_{avg} va standart og‘ish σ hisoblanadi.

3. **Modellarni tanlash va qurish**

- Boshlang‘ichda to‘g‘ri chiziqli va polinomial(3)-ni qo‘llab ko‘riladi; agar nolineylik ko‘zga tashlansa — polinomial yoki ko‘p omilli modelga o‘tiladi.
- Mavjud T yoki ε (dielektrik) kabi korreksion parametrlar mavjud bo‘lsa — ko‘p omilli regressiya quriladi:
- $W = a_0 + a_1U + a_2T + a_3U^2$ har bir model uchun koeffitsientlarni $(a_0, a_1,..)$ hisoblabadi.

4. **Modellarni baholash**

- RMSE, MAPE, R^2 va takrorlanuvchanlikni (σ_r) hisoblanadi.
- Dreyf va qayta tiklanuvchanlikni (reproducibility) baholanadi (turli kunlarda/shartlarda sinov).

5. **Xato budjeti**

- Har bir xatoning hissasi ($\Delta U, \Delta T, \Delta\varepsilon, \Delta_{drift}, \Delta_{rep}$) ni aniqlab, umumiy xato topiladi:

$$\Delta W = \sqrt{\sum \Delta_i^2}$$

6. **Temperatura kompensatsiyasi**
- Agar temperatura ta’siri sezilarli bo‘lsa — modelga T terminni kiriting yoki sensor elektronikasida kompensatsiya sinovini amalga oshiriladi.
7. **Validatsiya va kross-validatsiya**
- K-fold (masalan *K=5*) kross-validatsiya bilan modelning umumiylashuvchanligini tekshiriladi.
- Agar lozim bo‘lsa, modelni qayta o‘qiting yoki yangi ma’lumot qo‘shiladi.
8. **Eskirish va dastlabki tekshiruv**
- Sensorni vaqtda kuzatib, 30–90 kun davomida dreyfni baholanadi. Agar dreyf prognoz qilingan chegaradan oshsa — qayta kalibrlash jadvalini belgilab qo‘yiladi.
9. **Hisobot va meta-tartiblar**
- Kalibrlash sertifikatini shakllantiriladi (qo‘llanilgan usul, etalonlar, hisoblangan xato).
- Ishlab chiqarish /operatsiya uchun kalibrlash grafiklari va algoritmi joriy etiladi.

XULOSA

Tadqiqot namlik sensorlarining kalibrlash modellarini tahlil qilish va ularning metrologik barqarorligiga ta’sir etuvchi omillarni baholashga qaratildi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosalar chiqarildi.

Ushbu tadqiqot namlik sensorlarining kalibrlash jarayonida yuzaga keladigan xatolar tabiati va metrologik barqarorlikka ta’sir etuvchi omillarni chuqur o‘rganishga qaratildi. Olingan natijalar har xil turdagi matematik kalibrlash modellari (Chiziqli, polinomial, logarifmik, eksponensial va ko‘p omilli modellar)ning prognozlash qobiliyati va sezgirlik xususiyatlari o‘rtasida sezilarli farq borligini ko‘rsatdi. Jumladan: 3-darajali polinomial model namlikni aniq baxolashda eng yuqori aniqlikka ega bo‘lib, $R^2 \approx 0.99$ va minimal xatolikka erishdi. Chiziqli model past aniqlikka ega bo‘lib, amalda faqat taxminiy baholar uchun mos keladi. Haroratning ta’siri katta bo‘lib, uni hisobga olmagan modellar sezilarli sistematik xatolarga ega. Eksponensial va logarifmik modellar ma’lum diapazonlardagina samarali; umumiy kalibrlashda tavsiya etilmaydi. Sensor dreyfi va dielektrik material o‘zgarishi metrologik barqarorlikning asosiy cheklovchilari hisoblanadi. Qo‘p omilli *(U, T, U²)* modellar namlik o‘lchashni 30% gacha yaxshilab, sensorning uzoq muddatli barqarorligini oshiradi.

Tadqiqot natijalari namlik sensorlari uchun yangi avlod intellektual kalibrlash algoritmlarini ishlab chiqishga asos bo‘ladi.

ADABIYOTLAR RO‘YHATI

1. Trabelsi, S., & Nelson, S. O. (2020). Microwave sensing of grain moisture content: A review. *Measurement*, 159, 107786. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107786
2. Kandpal, L. M., Lee, H., & Cho, B.-K. (2019). Non-destructive sensing methods for food quality: A review. *Sensors*, 19(16), 3461. https://doi.org/10.3390/s19163461
3. Nelson, S. O. (2015). Dielectric properties of agricultural materials and their applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 49(1), 17–29. https://doi.org/10.1080/08327823.2015.11698082
4. Khaled, A. Y., et al. (2018). Moisture estimation in grains using dielectric and NIR techniques. *Biosystems Engineering*, 170, 81–93. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.006

5. Jha, S. N., & Narsaiah, K. S. (2021). Advances in electronic moisture sensors for agricultural products. *Food Analytical Methods*, 14, 992–1005. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01932-z
6. Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., & Nelson, S. O. (2013). Temperature-compensated microwave moisture measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(4), 866–872. https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2227252
7. Feng, H., & Tang, J. (2019). Dielectric properties and temperature effect in moisture sensing. *Food Engineering Reviews*, 11, 109–121. https://doi.org/10.1007/s12393-019-9192-
8. Moreira, V. R., et al. (2022). Stability and drift analysis of capacitive sensors: A comprehensive review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 341, 113592. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113592
9. P.I. Kalandarov. O‘zbekistonda metrologiya tizimi va uning ta’minotiga oid asosiy tushunchalar. “O‘zbekiston metrologiyasi” ilmiy-texnik jurnali. 2-2025. 8-13 b.
10. Каландаров П.И., Саидорипов Л. Ф., Искандаров Б. П. Влияние объёмной плотности зерна пшеницы на точность измерения его влажности сверхвысокочастотным методом. Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 5. С. 105-113. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-5-105-113
11. Каландаров П.И., Искандаров Б. П. Проточный влагомер для измерения влажности зерна в составе автоматизированной системы контроля влажности зерна. Измерительная техника. 2024. № 5. С. 18-25. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-5-18-25
12. Kalandarov P.I. Biogas production in biotechnological facilities Science and Innovation. 2024. Т. 3. № 1-1. С. 121-130. https://doi.org/10.5281/zenodo.10575821
13. Ikramov G.I., Kalandarov P.I. Measurement of grain and grain products moisture content by ultrahigh-frequency method: influence of grain density inhomogeneity on the mass ratio of moisture. Measurement Techniques. 2022. Т. 65. № 9. С. 695-701. https://doi.org/10.1007/s11018-023-02141-9
14. Kalandarov P., Murodova G. Study on microprocessor control of agricultural greenhouse microclimate/E3S Web of Conferences. 2024. Т. 497. С. 03026. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703026
15. Каландаров П.И., Искандаров Б. П. Проточный влагомер для измерения влажности зерна в составе автоматизированной системы контроля влажности зерна/Измерительная техника. 2024. № 5. С. 18-25. https://doi.org/10.1007/s11018-024-02354-6