



Co-funded by the
European Union



O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim,

Fan va Innovatsiyalar vazirligi

Toshkent shahridagi Turin Politehnika Universiteti

M.Usmonov

TEKNOLOGIK O'LCHOVLAR VA SANOAT ASBOBLARI

Talabalar uchun o'quv qo'llanma

Toshkent - 2025

Ushbu o'quv qo'llanma Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti (TTPU) Ilmiy Kengashining 2025 yil "2" noyabrdagi № "11/25" buyrug'iga asosan chop etishga tavsiya etilgan.

Mualliflar: M.M.Usmonov - "TTPU" "Avtomatik boshqaruv va kompyuter muhandisligi" kafedrası katta o'qituvchisi.

Taqrizchilar: N.Mahamatov - "TTPU", "Avtomatik boshqaruv va kompyuter muhandisligi" kafedrası, DSc. professor.

B.Yoqubov – “TTPU”, “Avtomatik boshqaruv va kompyuter muhandisligi” kafedrası mudiri (v.b.), PhD, dotsent

O'quv qo'llanma Evropa ittifoqining “Erasmus+” dasturi doirasida “O'zbekistonda quyosh energetikasi bo'yicha maqsadli muhandislar tayorlash o'quv dasturini ishlab chiqish” (101128871 - DEBSEUz - ERASMUS-EDU-2023-CBHE) loyihasida ko'zda tutilgan amaliy natijalardan biri sifatida tayyorlangan.

Muqaddima

O'lchov – bu har bir muvaffaqiyatli muhandislik ishidagi ajralmas qismidir. Biz quyosh-issiqlik qurilmasidagi termopara o'zgarishini kuzatamizmi yoki neftni qayta ishlash zavodidagi tenzodatchik signallarini o'qiyamizmi, ishonchli ma'lumotlar barcha sohalar uchun yagona umumiy til hisoblanadi. Ikki yuz sahifaga yaqin ushbu o'quv qo'llanma katta kurs muhandislik talabalariga energiya va qayta tiklanadigan energiya ilovalariga urg'u bergan holda, dastlabki prinsiplardan tortib sanoatga tayyor asbobsozlikkacha bo'lgan amaliy va izchil yo'lni ko'rsatish uchun tayyorlandi.

O'quvchilar aniqlik, izchillik va noaniqlik kabi mavzular bilan birga, nima uchun hatto yaxshi kalibrlangan datchik ham tebranayotgan quvurda yoki cho'l sharoitida kutilgan natijani bermasligi mumkinligi haqidagi amaliy mulohazalarga ham duch keladilar.

Matnda yodlashdan ko'ra amaliy yondashuvlarga ustuvorlik berilgan. Metrologiya konsepsiyalaridan so'ng, harorat, bosim, oqim sarfi, elektr va kimyoviy o'lchovlar bosqichma-bosqich o'rganiladi hamda har biri oddiy uskunalar bilan bajarish mumkin bo'lgan laboratoriya mashg'ulotlari orqali mustahkamlanadi. Signalni moslashtirish, ma'lumotlarni yig'ish va kalibrlash amaliyotlari har bir mavzuga kiritilgan bo'lib, asbobsozlik alohida komponent emas, balki yaxlit tizim ekanligini ko'rsatadi. Misollar ko'pincha fotovoltaik monitoring, quyosh issiqlik tizimlari, energiya saqlash va aniq o'lchovlar xavfsizlik hamda samaradorlikni ta'minlaydigan boshqa sohalardan olingan.

Sanoat standartlari o'zgarib boradi, datchik texnologiyalari takomillashadi va energiya sohasi ham tezkorlik bilan yangilanadi. Shuning uchun o'quvchilarga ushbu hujjatdan asosiy poydevor sifatida foydalanish tavsiya etiladi. Kelgusida eng so'nggi ma'lumotlar jadvallari, standartlar va qo'llanmalarga murojaat qilish zarurati hamisha saqlanib qoladi.

Va nihoyat, ushbu qo'llanmani shakllantirishda o'z savollari, tajribalari va tavsiyalari bilan hissa qo'shgan hamkasblar, talabalar va soha mutaxassislariga minnatdorchilik bildiraman. Umid qilamanki, ushbu sahifalar o'quvchilarga xom ma'lumotlarni ishonchli bilimga aylantirishda yordam beradigan asbobsozlik bo'yicha mustahkam ko'nikmalarni shakllantirishga xizmat qiladi.

1. O'lchash tizimlariga kirish

1.1 Sanoatda o'lchashning roli

O'lchash muhandislik jarayonlarida boshqarish va takomillashtirishning asosidir. Lord Kelvin mashhur tarzda shunday degan: "O'lchash - bilishdir... Agar siz biror narsani o'lchay olmasangiz, uni yaxshilay olmaysiz." Sanoat sharoitida, ayniqsa energetika tizimlarida ishonchli o'lchovlar xavfsizlik, samaradorlik va optimallashtirish uchun juda muhim. Masalan, zamonaviy elektr stansiyalari va quyosh energetikasi obyektlari harorat, bosim, sarf (oqim) tezligi va elektr chiqishlarini uzluksiz nazorat qilish uchun datchiklardan foydalanadi. Bu o'lchovlar avtomatik boshqaruv tizimlariga qizib ketish, ortiqcha bosim yoki boshqa xavfli holatlarning oldini olishga yordam beradi va muhandislarga eng yuqori samaradorlikka erishish uchun ish rejimlarini nozik sozlash imkonini beradi. Quyosh fotoelektr (PV) stansiyalarida quyosh nurlanishi (irradiatsiya) va modul chiqishini o'lchash yuqori "performance ratio"ni (ishlash ko'rsatkichi nisbatini) saqlashga hamda soyalash yoki uskuna nosozligi kabi muammolarni tez aniqlashga xizmat qiladi. Quyosh energiyasi o'lchagichlari (**piranometrlar**) beradigan aniq ma'lumotlar sirtga tushayotgan quyosh energiyasini miqdoriy baholash va PV stansiya samaradorligini optimallashtirish uchun "ajralmas" hisoblanadi.



Rasm 1: Quyosh nurlanishini o'lchash

Tarixan, o'lchash sohasidagi yutuqlar texnologik taraqqiyotga kuchli turtki bergan. Torricellining 1643 yilda simobli barometri (bosimni o'lchash uchun) va 17-asrdagi dastlabki termometrlar kabi qurilmalar olimlar va muhandislarga yangi hodisalarni tushunish va boshqarish imkonini berdi. O'lchov birliklarini standartlashtirish (masalan, SI tizimining qabul qilinishi) va milliy metrologiya

institutlarining tashkil etilishi global asos yaratdi, ya'ni bir mamlakatda o'lchangan qiymatlar boshqa mamlakatdagilar bilan mos va taqqoslanadigan bo'ldi. Qayta tiklanuvchi energiya kontekstida quyosh nurlanishini tizimli o'lchash 19-asrda boshlangan bo'lib, bu quyosh kollektorlarining va PV elementlarning rivojlanishiga zamin yaratdi. Bugun "o'lchamasangiz, boshqara olmaysiz" tamoyili energetika tizimlari uchun ayniqsa dolzarb: faqat aniq o'lchashlar orqali quyosh panellarining samaradorligini oshirish, quyosh issiqlik stansiyalarining maksimal quvvatda ishlashini ta'minlash hamda sanoat operatsiyalarida xavfsizlik va me'yoriy talablarni bajarish mumkin.

1.2 Asosiy terminlar va metrologiya tushunchalari

O'lchanadigan kattalik (measurand)

O'lchash uchun mo'ljallangan aniq kattalik. Masalan, quyosh energetikasi kontekstida o'lchanadigan kattalik issiqlik tashuvchi suyuqlik harorati, panel yuzasidagi quyosh nurlanishi (irradiatsiya) yoki PV massividan chiqayotgan tok bo'lishi mumkin. O'lchanadigan kattalikni (shu jumladan u qanday sharoitda o'lchanishini) aniq ta'riflash muhim. Masalan, "harorat" deganda suyuqlikning umumiy (hajm bo'yicha) harorati nazarda tutiladimi yoki sirt haroratimi, buni belgilash to'g'ri o'lchash uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Datchik (sensor) va o'zgartirgich (transducer)

Datchik - o'lchash tizimining o'lchanadigan kattalikka bevosita javob beradigan elementi. *O'zgartirgich* esa o'lchash signalini uzatish uchun energiya bir turini boshqa turga aylantiradi. Amaliyotda bu atamalar ko'pincha bir-birining o'rnida ishlatiladi. Oddiy datchikka misol - suyuqlikli shisha termometr: suyuqlikning kengayishi haroratni (o'lchanadigan kattalikni) bevosita ko'rsatadi. Ko'p hollarda datchikning "xom" chiqish signali bevosita o'qish uchun qulay bo'lmaydi (masalan, tenzodatchikda qarshilikning o'zgarishi). O'zgartirgich odatda sezuvchi elementni va o'zgaruvchini "foydaliroq" ko'rinishga keltiruvchi **konversiya qismini** birlashtiradi (masalan, kuchlanish signaliga). Masalan, tenzodatchikli bosim sensori bosimdan hosil bo'lgan deformatsiyani elektr qarshilik o'zgarishiga aylantiradi, ko'pri sxemasi esa (o'zgartirgich sifatida) bu o'zgarishni kuchlanish signaliga aylantiradi.

Transmitterni masofaga uzatish uchun qo'shimcha signalni moslashtirish (signal conditioning) qo'shilgan o'zgartirgich deb qarash mumkin. Xulosa qilib,

datchik/o'zgartirgichlar fizik jarayonlarni asbob-uskunalar (instrumentation) bilan bog'laydi va o'lchanadigan kattalikni ifodalovchi signallarni (elektr, pnevmatik, optik va boshqalar) hosil qiladi.

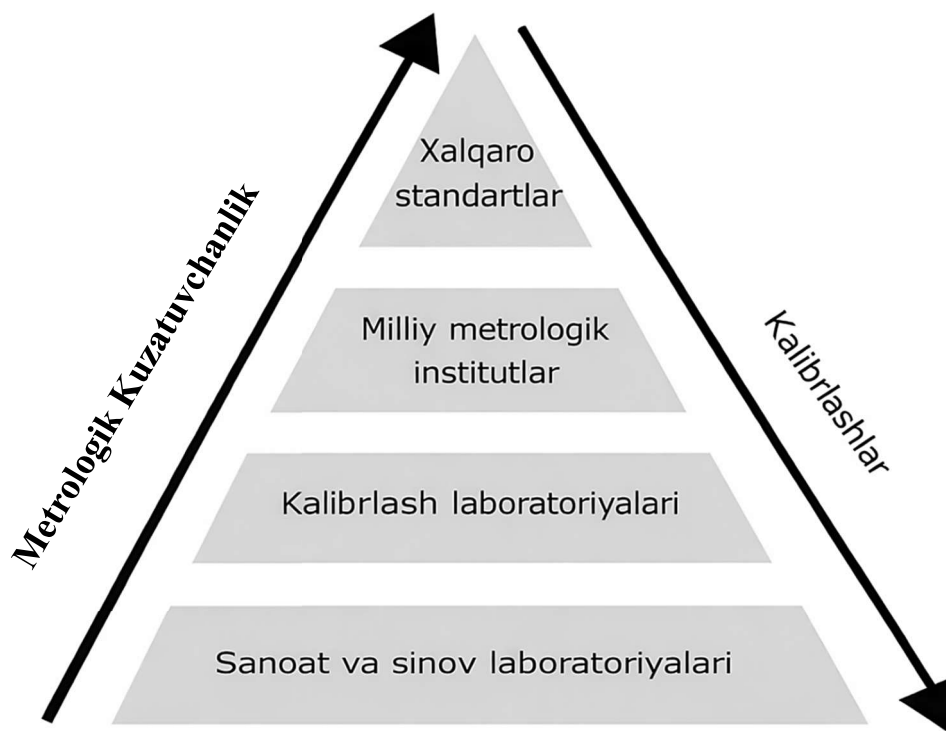
Kalibrlash (calibration)

Asbob ko'rsatishini ma'lum (etalon) qiymat bilan solishtirish va og'ishini sozlash yoki qayd etish jarayoni. Kalibrlash asbob ko'rsatishi bilan o'lchanadigan kattalikning haqiqiy qiymati orasidagi bog'lanishni aniqlaydi. Natijada kalibrlash koeffitsienti yoki kalibrlash egri chizig'i olinadi va ko'pincha asbob uchun noaniqlik bahosi ham beriladi. Kalibrlash muntazam bajarilishi kerak, chunki vaqt o'tishi bilan asbob ko'rsatishlari "siljishi" (drift) yoki dastlabki og'ishlarga ega bo'lishi mumkin. Kalibrlashning asosiy maqsadlari: standartlarga **izchillikni** (traceability) ta'minlash, boshqa o'lchovlar bilan moslikni saqlash, asbob aniqligini baholash va ishonchliligiga ishonchni oshirish. Masalan, quyosh stansiyasidagi piranometr yiliga bir marta (yoki belgilangan davriylikda) etalon datchik bilan solishtirib kalibrlanadi, shunda uning quyosh irradiatsiyasi (W/m^2) bo'yicha ko'rsatishlari talab etilgan aniqlik doirasida qoladi.

Izchillik (traceability)

Metrologiyada izchillik - o'lchash natijalarini uzluksiz kalibrlashlar zanjiri orqali (odatda milliy yoki xalqaro standartlarga) bog'lash xususiyati. Buni aniqlik uchun "hujjatli zanjir" deb tasavvur qilish mumkin: masalan, termometr ko'rsatishiga ishonish uchun u yuqori darajadagi termometrga nisbatan kalibrlangan bo'lishi, u esa o'z navbatida milliy metrologiya institutidagi birlamchi etalonga bog'langan bo'lishi kerak. Izchillik zanjiri ko'pincha piramida ko'rinishida tasvirlanadi. Eng yuqorida - birlamchi standartlar (SI birliklarini amalda "ro'yobga chiqaradigan" etalonlar). Undan pastda - ikkilamchi standartlar (birlamchiga nisbatan kalibrlangan). Keyin ishchi standartlar va ularga nisbatan kalibrlanadigan maydon/sex asboblari keladi.

Har bir kalibrlash bosqichi ma'lum noaniqlikni qo'shadi. Shuning uchun izchillik nafaqat o'lchashlarni asosiy birliklar bilan bog'laydi, balki har bir daraja uchun noaniqlik bahosini ham beradi. Sanoatda izchillik sifatni ta'minlash uchun juda muhim: masalan, quyosh issiqlik stansiyasidagi boshqaruv tizimi harorat o'lchovlari milliy harorat standartlariga izchil bo'lishi kerak, shunda operatsion qarorlar uchun u ishonchli hisoblanadi.



Rasm 2: Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi

Standartlar (etalonlar)

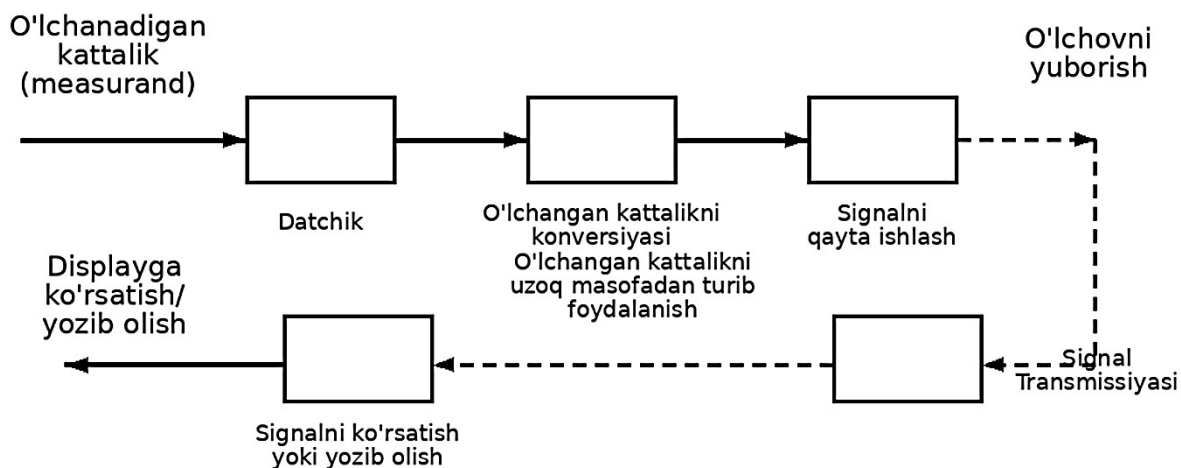
O'lchov standarti (etalon) - o'lchanadigan kattalik birligini yuqori aniqlikda belgilaydigan yoki qayta hosil qiladigan obyekt, asbob yoki tizim. Masalan, harorat standarti sifatida yuqori aniqlikdagi platinali qarshilik termometri yoki uzunlikni kalibrlash uchun aniq o'lchamli bloklar (gauge blocks) to'plami. Standartlar turli darajalarga ega:

- **Birlamchi standart** birlikni bevosita ro'yobga chiqaradi (masalan, 273.16 K uchun suvning kiritik nuqtasi - kelvinni ta'riflashda ishlatiladi).
- **Ikkilamchi standart** birlamchiga nisbatan kalibrlanadi (masalan, laboratoriyaning etalon termoparasi yoki referens termometri).
- **Ishchi standart** esa zavod/obyekt sharoitida kundalik asboblarni kalibrlashda qo'llaniladi.

Quyosh energetikasida irradiatsiya datchiklarini kalibrlash uchun **standart (referens) quyosh elementi** yoki **referens hujayra**, shuningdek sovitish suvi sifatini nazorat qilishda pH o'lchagichlarni tekshirish uchun **standart eritmalar** uchraydi. Standartlar "hamma bir xil o'lchov mezonidan foydalanishi"ni ta'minlaydi

va butun dunyo bo'ylab muhandislik o'lchovlarining mosligi uchun tayanch hisoblanadi.

Xulosa qilib, **metrologiya** (o'lchash fani) o'lchovlar mazmunli va taqqoslanadigan bo'lishi uchun umumiy tilni (birliklar, standartlar) va tizimli asosni (izchillik, kalibrlash ierarxiyasi) beradi - u bitta quyosh paneli chiqishini baholashdan tortib, yirik sanoat energetika tizimini boshqarishgacha bo'lgan barcha vazifalarda zarur.



Rasm 3: O'lchov tizimi elementlari

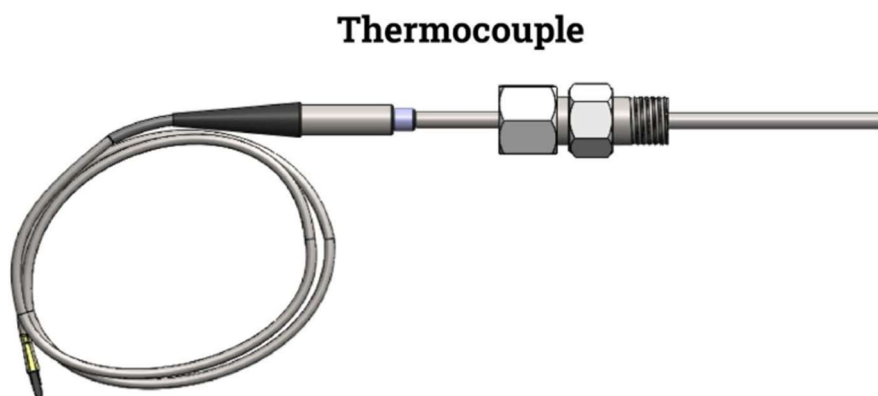
1.3 Asosiy kattaliklar uchun o'lchash asboblari bo'yicha umumiy ma'lumotlar

Sanoat o'lchovlarida juda ko'p turdagi asboblari qo'llaniladi. Bu bo'limda **harorat, bosim, oqim sarfi, kuchlanish, tok kuchi** va **kimyoviy tarkibni** o'lchash uchun asosiy turlar keltiriladi, hamda ularning ishlash prinsiplari va quyosh issiqlik (solar thermal) hamda fotoelektr (PV) tizimlaridagi aniq vazifalari qayd etiladi.

Haroratni o'lchash asboblari

Harorat odatda harorat o'zgarganda o'zgaradigan fizik xossalardan foydalanish orqali o'lchanadi. **Termoparalar** keng qo'llaniladigan harorat datchiklari bo'lib, ular uchi birlashtirilgan ikki xil metall simdan tashkil topadi; ular haroratlari farqiga proporsional kichik kuchlanish hosil qiladi (*Zebek effekti*). Termoparalar keng diapazonni qamrab oladi (turiga qarab kriogen haroratlardan $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha) va mustahkam bo'ladi, shu sababli quyosh-issiqlik stansiyalari ularni issiqlik uzatuvchi suyuqlik harorati va qabul qilgich quvurlari haroratini kuzatishda keng ishlatadi. Masalan, K-tur (Ni-Cr/Ni-Al) termoparalar $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ dagi eritilgan tuz konturini nazorat qilishi mumkin. **Qarshilikli harorat datchiklari (RTD)** metallning elektr qarshiligi harorat bilan aniq qonuniyat bo'yicha ortish prinsipiga asoslanadi.

Masalan, platinali RTD $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha bo'lgan diapazonda juda aniq va barqaror ko'rsatishlarni beradi. RTDlar termoparalarga nisbatan yuqoriroq aniqlik va takrorlanuvchanlikka ega va taxminan $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan past sanoat qo'llanmalarida tobora ko'proq ishlatilmoqda. PV elektr stansiyasida RTDlar atrof-muhit havosi haroratini yoki panelning orqa sirt haroratini o'lchashi mumkin (bu muhim, chunki harorat oshgani sari PV samaradorligi pasayadi). **Termistorlar** ham rezistorga asoslangan yana bir datchik turi bo'lib, ular harorat bilan katta qarshilik o'zgarishini beradigan keramika yoki yarimo'tkazgichlardan foydalanadi. Ular cheklangan diapazonda juda sezgir (odatda elektron qurilma harorati yoki akkumulyator paketlarida qo'llaniladi). Masalan, termistor quyosh + energiya saqlash tizimida qizib ketishni oldini olish uchun akkumulyator haroratlarini nazorat qilishi mumkin. Nihoyat, **kontaktsiz infraqizil (IR) termometrlar/pirometrlar** issiqlik nurlanishini aniqlaydi; ular obyektga tegmasdan sirt haroratini (masalan, PV modul oynasining harorati yoki quyosh pechi nishoni) o'lchashda ishlatiladi. Xulosa qilib, quyosh sohasidagi harorat o'lchash asboblari komponentlarning xavfsiz chegaralarda ishlashini ta'minlaydi va samaradorlikni baholashga yordam beradi (chunki harorat samaradorlik va materialning xizmat muddati bilan bevosita bog'liq).

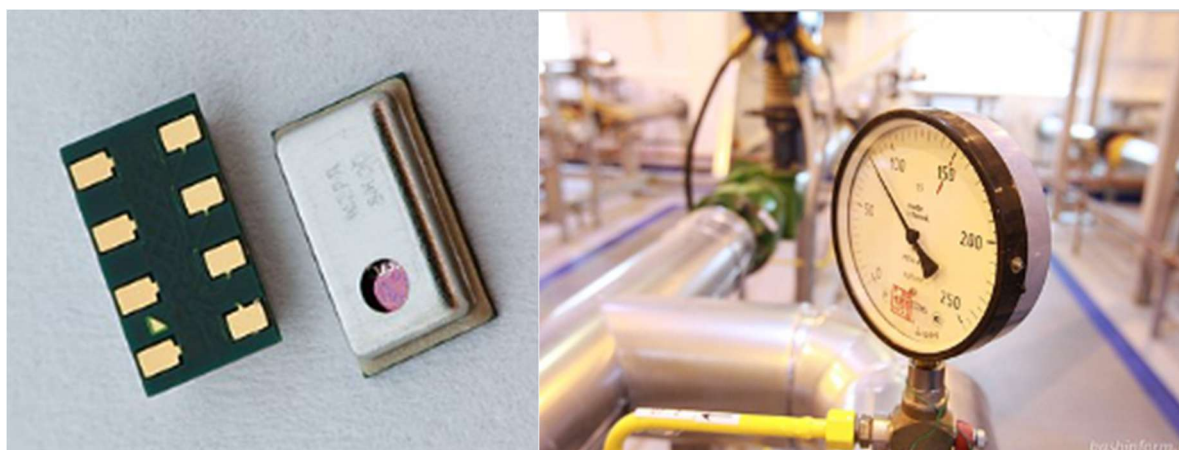


Rasm 4: Termopara

Bosimni o'lchash asboblari

Bourdon trubkali **manometrlar** va suyuqlikli manometrlar kabi mexanik bosim o'lchagichlar bosimni joyida (lokal) ko'rsatadi. Bourdon o'lchagich bosim o'zgarganda egiladigan o'ralgan metall trubkadan foydalanadi va strelkali shkalani harakatga keltiradi, masalan, quyosh issiqlik tizimidagi issiqlik tashuvchi suyuqlik konturining bosimlanishini kuzatishda foydali. U-shaklli manometrlar bosim farqini suyuqlik ustunlari orqali (suyuqlik balandligiga asoslanib) o'lchaydi va soddada hamda aniq bo'lsa-da, asosan laboratoriya sharoitida yoki kalibrlashda uchraydi,

masofadan yoki elektron monitoring uchun amaliy emas. Zamonaviy sanoat tizimlari ko'proq **elektron bosim datchiklarni** afzal ko'radi. Eng keng tarqalgani **pyezorezistiv tenzodatchikli datchiklar**: bosim ta'sirida deformatsiyalanadigan, ustiga tenzodatchiklar yopishtirilgan yupqa diafragma qarshilikni o'zgartiradi va elektr signalini hosil qiladi (ko'pincha Wheatstone ko'prigi orqali). Bular nasoslar, quvurlar va rezervuarlarda uchraydigan umumiy maqsadli bosim datchiklari bo'lib, masalan, konsentratsiyalangan quyosh energiyasi (CSP) stansiyasida quvurlardagi moy bosimini yoki quyosh trekeriga ta'sir qilayotgan shamol bosimini o'lchashda ishlatiladi. Mos konstruktsiya tanlanganda ular vakuumdan juda yuqori bosimlarga (minglab bar) diapazonni qamrab oladi. Yana bir tur, **pyezoelektrik bosim datchiklari** kvarts kabi kristallardan foydalanadi, ular bosim ta'sirida elektr zaryad hosil qiladi. Ular dinamik bosim o'lchovlarida (tez o'zgaradigan bosimlar) juda yaxshi, biroq statik (barqaror) bosimni bevosita o'lchay olmaydi. Quyosh kontekstida pyezoelektrik datchik akustik bosim tebranishlarini o'lchash bo'yicha tadqiqotlarda yoki mexanik vibratsiyalarni aniqlashda ishlatilishi mumkin. Shuningdek, **sig'imli bosim datchiklari** (diafragma sig'imi o'zgarishi orqali bosimni o'lchaydi) va **optik bosim datchiklari** (masalan, juda yuqori harorat muhitlari kabi maxsus holatlar uchun fiber Bragg panjaralari yoki interferometriyadan foydalanadi) ham mavjud. Ko'pchilik quyosh energiyasi obyektlarida bosim o'lchash asboblari suyuqliklar (suv, bug', moy yoki gaz) loyihaviy chegaralarda qolishini ta'minlaydi, masalan, quyosh bug' generatorida ortiqcha bosimning oldini oladi yoki quyosh trekerining aktuatoridagi gidravlik bosimni kuzatadi.



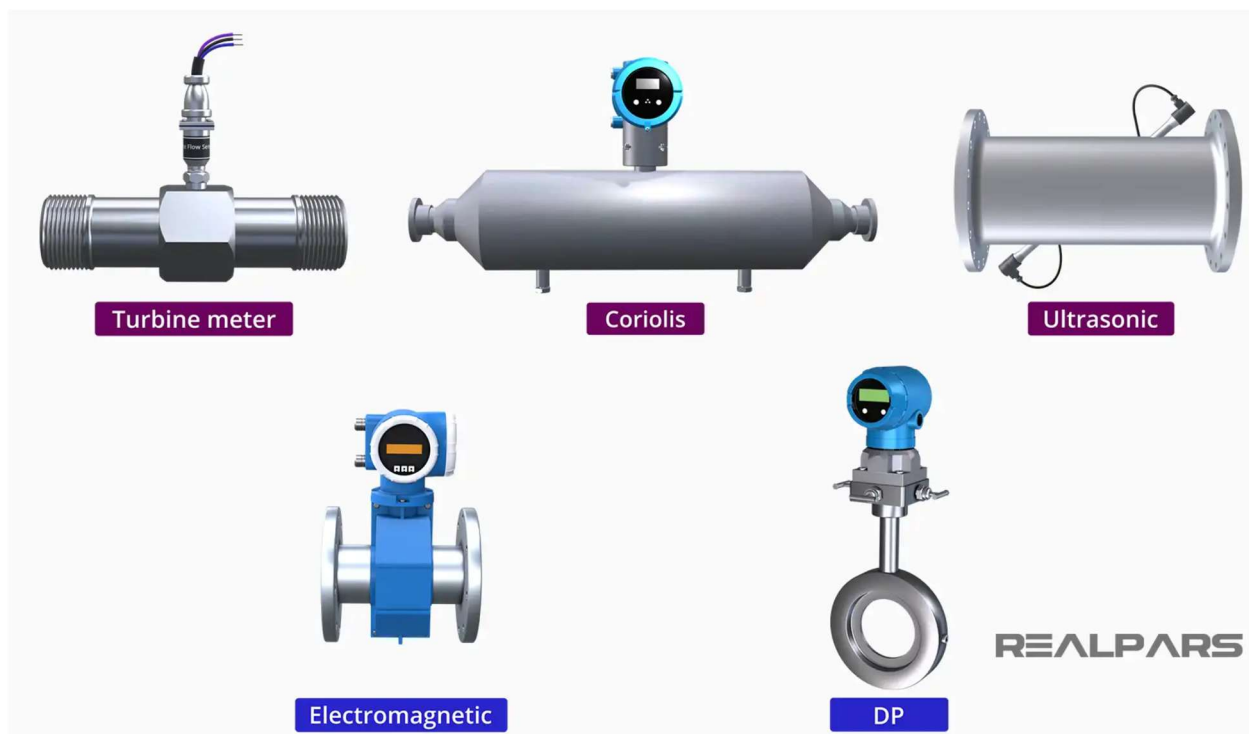
Rasm 5: Bosim O'lchash Apparatlari

Oqim sarfi asboblari

Suyuqliklar (suyuqliklar yoki gazlar) harakatlanadigan har qanday tizimda oqim sarfini o'lchash juda muhim. Turli xil oqim o'lchagichlar qo'llaniladi, va ularning

har biri suyuqlik turi hamda ish sharoitiga mos tanlanadi. **Differensial bosim (DP)** asosidagi oqim o'lchagichlar sanoatda eng keng qo'llaniladigan turlardan hisoblanadi. Ular quvur ichida toraytiruvchi element (masalan, **diafragma plastinasi** - orifice plate, **Venturi trubkasi** yoki **oqim soplosi** - flow nozzle) hosil qiladi va bu oqim sarfiga bog'liq bosim tushuvini yuzaga keltiradi (Bernulli prinsipi bo'yicha). Yuqori oqim (upstream) va quyi oqim (downstream) bosimlarini o'lchash orqali oqim sarfini aniqlash mumkin. Bu qurilmalarda harakatlanuvchi qismlar yo'q, biroq ular ma'lum bosim yo'qotilishiga olib keladi. Quyosh issiqlik stansiyasida, masalan, diafragma plastinasi issiqlik uzatuvchi moy oqim sarfini o'lchashi mumkin, va bu uzatilayotgan issiqlik quvvatini hisoblashga imkon beradi (chunki $quvvat = massa\ sarfi \times solishtirma\ issiqlik\ sig'imi \times harorat\ oshishi$). **Turbinali oqim o'lchagichlar** oqim ichiga o'rnatilgan kichik propeller yoki turbina orqali ishlaydi; aylanish tezligi (pickup g'altagi orqali seziladi) oqim tezligiga proporsional bo'ladi. Ular toza suyuqliklar yoki gazlar uchun yaxshi aniqlik beradi. Masalan, turbinali o'lchagich quyosh bug' qozoniga kiruvchi oziqlantiruvchi suv (feedwater) oqim sarfini yoki quyoshdan vodorodga yoqilg'i tizimidagi vodorod gazi oqim sarfini o'lchashi mumkin. **Ultrasonik oqim o'lchagichlar** invaziv bo'lmagan qurilmalar bo'lib, ular quvur tashqi yuzasiga qisqich bilan mahkamlanadi yoki quvur ichiga o'rnatiladigan transduserlarga ega bo'ladi. Ular ultratovush impulsini yuboradi va yuqori oqim hamda quyi oqim yo'nalishlarida tranzit vaqt farqini o'lchaydi (toza suyuqliklar uchun) yoki zarrachalar/pufakchalardan qaytgan signalning Doppler siljishini o'lchaydi (iflos suyuqliklar uchun). Ultrasonik o'lchagichlar katta diametrli quvurlar uchun yoki quvurni teshib kirish istalmaganda juda qulay; masalan, katta quyosh issiqlik stansiyasidagi eritilgan tuz quvur liniyasida quvurni kesmasdan oqim sarfini o'lchash. **Vorteks oqim o'lchagichlar** vorteks ajralishi prinsipidan foydalanadi: oqim ichidagi to'siqli (bluff body) element vortekslarni hosil qiladi va ularning chastotasi oqim sarfiga proporsional bo'ladi, bu chastota datchik orqali aniqlanadi. Ular mustahkam, harakatlanuvchi qismlari yo'q va suyuqlik, gaz hamda bug' bilan ishlay oladi; vorteks o'lchagich quyosh issiqlik elektr stansiyasida bug' oqimini yoki sovitish tizimidagi havo oqimini kuzatishi mumkin. Boshqa turlarga **elektromagnit oqim o'lchagichlar** (o'tkazuvchan suyuqliklar uchun, Faradey induksiya qonuniga asoslanadi), **rotametr**lar (konussimon trubkada suzuvchi elementli, o'zgaruvchan kesim maydonli oqim o'lchagich), va Coriolis o'lchagichlari kabi ilg'or **massa oqim o'lchagichlar** kiradi (Coriolis kuchlari orqali massa sarfini bevosita o'lchaydi, yuqori aniqlik talab qilinganda yoki suyuqlik zichligi o'zgaradigan holatlarda foydali). Quyosh obyektlarida oqim sarfini o'lchash energiya hisob-kitoblarini bajarishga (issiqlik energiyasi oqimlari uchun), issiqlik tizimlarida sovutuvchi suyuqlik yoki sovutgich agenti (refrigerant) aylanishi me'yor doirasida ekanini ta'minlashga, va hatto zaxira

generatorlaridagi yoqilg'i sarfini kuzatishga imkon beradi. Quyosh energiyasi yordamida yoqilg'i ishlab chiqarish jarayonlari uchun ham aniq oqim sarfini boshqarish juda muhim (masalan, reaksiya gazlarini belgilangan sarflarda uzatish).



*Rasm 6: Turli xil oqim sarfi o'lchagichlar [*manba: RealPars]*

Har bir oqim sarfi asbobi turi aniqlik, diapazon va suyuqlikka moslik o'rtasida muvozanatni ta'minlaydi; muhandislar tanlovni qo'llanma ehtiyojiga qarab qiladi (masalan, yuqori haroratli suyuqliklar uchun DP o'lchagichlar, katta diametrli quvurlar uchun ultrasonik o'lchagichlar va h.k.).

Elektr o'lchash asboblari (kuchlanish, tok kuchi, quvvat)

Quyosh muhandisligida elektr o'lchovlar asosan zanjirlardagi kuchlanishlar, tok kuchlari, qarshilik va quvvat bilan bog'liq. Asosiy asboblari kuchlanish uchun **voltmetr** va tok kuchi uchun **ampermetr** hisoblanadi; hozirda ular odatda **raqamli multimetr (DMM)** ko'rinishida birlashtiriladi va kuchlanish, tok kuchi hamda qarshilikni o'lchay oladi. Sanoat sharoitida monitoring uchun yuqori kuchlanish yoki katta tok kuchlarini xavfsiz va standart signalga (masalan, 4-20 mA yoki 0-10 V) aylantirish maqsadida ko'pincha **o'zgartirgichlar** (transduserlar) ishlatiladi. Masalan, quyosh panellari PV massivlaridan chiqayotgan doimiy tok (DC) tok kuchini o'lchash uchun **Hall-effekti asosidagi tok datchiklari** yoki shunt rezistorlardan foydalanishi mumkin. Hall-effekti datchigi tok kuchiga proporsional kuchlanish beradi (o'tkazgich atrofidagi magnit maydonni sezish orqali) va katta tok kuchlarini (o'nlabdan yuzlab ampergacha) invaziv bo'lmagan usulda o'lchash uchun

qulay, masalan, PV string kompaynerlarida yoki akkumulyator ulanishlarida. Kuchlanish transformatorlari va bo'luvchilar yuqori kuchlanishlarni (masalan, panel stringi yoki inverter chiqishi) o'lchash mumkin bo'lgan darajalarga tushirish uchun ishlatiladi. **Ossillograflar** kuchlanishni (va ba'zan maxsus zondlar orqali tok kuchini ham) vaqt bo'yicha yuqori tezlikda grafik ko'rinishda tasvirlaydigan asboblardir bo'lib, ular quvvat elektronikasida (masalan, quyosh inverterlarida) DMM ushlay olmaydigan to'liq shakllari, kommutatsiya o'tish jarayonlari (switching transients) yoki yuqori chastotali xatti-harakatlarni kuzatishda qo'llaniladi. Fotoelektr tizim kontekstida odatiy o'lchovlarga har bir panelning ochiq zanjir kuchlanishini va qisqa tutashuv tok kuchini tekshirish (sifat nazorati uchun), panel ish faoliyatini tavsiflash uchun **IV-egri chizig'i treyserlaridan** foydalanish, va inverterlarning AC chiqish sifatini o'lchash uchun **quvvat analizatorlarini** qo'llash (kuchlanish, tok kuchi, faza, chastota, garmonikalar va h.k.) kiradi. Quyosh stansiyalaridagi **ma'lumotlarni yig'ish (DAQ)** tizimlari va **SCADA** monitoringi ko'plab datchiklardan keladigan ko'rsatkichlarni bir joyga jamlaydi: ular quvvat chiqishini qayd etish, nosozliklarni aniqlash va operatorlarga ishlash ko'rsatkichlarini hisobot qilish uchun aniq kuchlanish/tok o'zgartirgichlariga tayanadi. Xulosa qilib, qo'l multimetridan tortib stansiya miqyosidagi monitoring tizimigacha bo'lgan elektr o'lchash asboblari PV qurilmasining "asab tizimi" bo'lib, quyosh energiyasini ishlab chiqarish va taqsimlash jarayonlari kuzatilishi, boshqarilishi va optimallashtirilishini ta'minlaydi. Aniq elektr o'lchovlar samaradorlik hisob-kitoblariga ham (elektr chiqishni quyosh kirishi bilan solishtirish) va himoya tizimlariga ham asos bo'ladi (masalan, tok kuchi juda yuqori bo'lsa avtomatlarni o'chirib yuborish va h.k.).



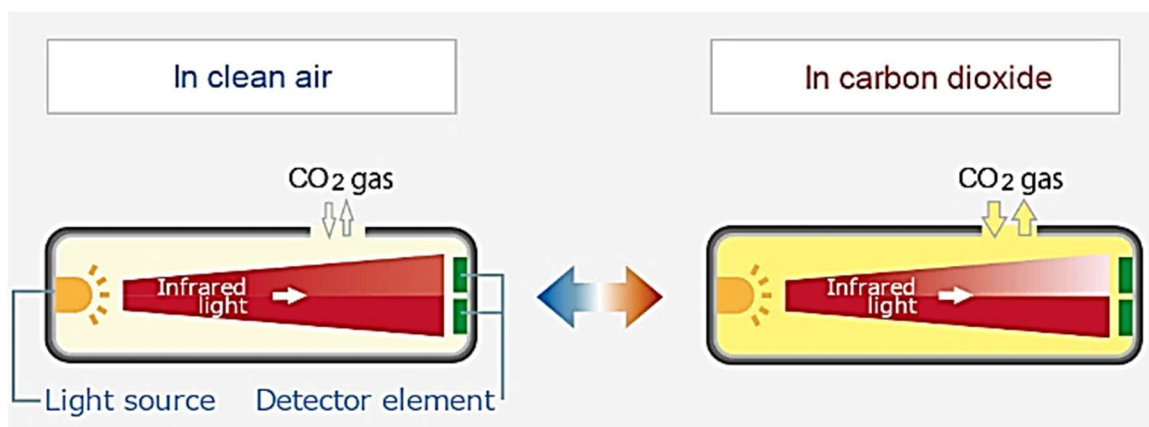
Rasm 7: Elektr O'lchash Qurilmalari

Kimyoviy tarkib datchiklari

Energetika tizimlarida samaradorlik, xavfsizlik yoki ekologik me'yorlarga muvofiqlik uchun suyuqliklar (gazlar yoki suyuqliklar) tarkibini kuzatish ko'pincha

talab etiladi. Quyosh energetikasi qo'llanmalarida bu gaz datchiklari, pH va elektr o'tkazuvchanlik datchiklari hamda boshqa analizatorlarni o'z ichiga olishi mumkin:

- *Gaz konsentratsiyasi datchiklari:* Bu datchiklar ma'lum gaz turlarini aniqlaydi va ularning konsentratsiyasini miqdoriy baholaydi. Keng tarqalgan turlarga CO₂ kabi gazlar uchun **NDIR (Dispersiya bo'lmagan infraqizil)** datchiklari kiradi (bunda gazlar infraqizil nurni o'ziga xos to'lqin uzunliklarida yutadi, datchik esa yutilishni konsentratsiyaga proporsional tarzda o'lchaydi), hamda O₂, CO, H₂S kabi gazlar uchun **elektrokimyoviy yacheykalar** kiradi, ular gaz konsentratsiyasiga proporsional bo'lgan redoks reaksiyasi orqali tok kuchi hosil qiladi. Eritilgan tuzli akkumulyatsiya (molten salt storage) ishlatiladigan quyosh-issiqlik quvvat minorasida (power tower) zaxira yoqilg'i yonishi (backup burner) qo'llanilsa, tutun yo'lida O₂ datchiklari yoki yonish chiqindilarini kuzatish uchun **CO₂ analizatorlari** bo'lishi mumkin. PV ishlab chiqarish yoki qayta ishlash obyektlarida gaz datchiklari zaharli bug'lar/chiqindilarni nazorat qilishi mumkin (masalan, quyosh elementlarini tayyorlashda ishlatiladigan silan yoki fosfin). Kengroq energetika sanoatida gaz analizatorlari chiqarilayotgan gazlar (NO_x, SO₂, CO) ekologik chegaralar ichida ekanini ta'minlaydi; bular yoqilg'i asosidagi komponenti bor har qanday quyosh-gibrid stansiyasi uchun juda muhim.



Rasm 8: NDIR (Dispersiya bo'lmagan infraqizil) gaz sensorining tuzilishi

- *pH o'lchagichlar:* pH o'lchagich eritmadagi vodorod-ion faolligini o'lchaydi va uning kislotali yoki ishqoriyligini ko'rsatadi. Energetika tizimlarida pH nazorati suv sifatini ta'minlash uchun muhim, masalan, suv/bug' ishlatadigan quyosh issiqlik stansiyalari (CSP Rankin sikli kabi) qozon suvining pH qiymatini yaqin nazorat qilishni talab qiladi, chunki bu korroziya yoki qotma (scaling) hosil bo'lishining oldini oladi. pH datchigi (shisha elektrod va etalon elektrod) bug' generatoriga suv uzatadigan suv tayyorlash konturiga o'rnatilishi mumkin. Xuddi shuningdek, agar quyosh fermasida panellarni

nam usulda yuvish qo'llanilsa yoki sovitish suyuqliklari ishlatilsa, pH o'lchovi suyuqliklar xavfsiz kimyoviy chegaralarda qolishini ta'minlaydi.



Rasm 9: Oddiy pH o'lchagich datchik

- *Elektr o'tkazuvchanlik (ion konsentratsiyasi) datchiklari:* Bu datchiklar suyuqlikning elektr o'tkazuvchanligini o'lchaydi va u erigan ionli moddalarning (tuzlar va boshqalar) konsentratsiyasi bilan bog'liq bo'ladi. Elektr stansiyalarida elektr o'tkazuvchanlik o'lchagichlar pH o'lchagichlar bilan birga oziqlantiruvchi suv (feedwater) tozaligini kuzatish uchun ishlatiladi, yuqori o'tkazuvchanlik ifloslanishni ko'rsatadi va bu korroziya yoki cho'kma hosil bo'lishiga olib kelishi mumkin. Quyosh issiqlik tizimlarida issiqlik uzatuvchi suyuqliklar yoki issiqlik akkumulyatsiya muhiti uchun past o'tkazuvchanlikni saqlash muhim bo'lishi mumkin (masalan, eritilgan tuzlarda elektrokimyoviy korroziyaning oldini olish uchun). PV ekspluatatsiyasida modullarni yuvishda ishlatiladigan suv o'tkazuvchanligi ham kuzatilishi mumkin, ayniqsa cho'kma qoldirmaslik uchun ultra-toza suv talab etilganda.
- *Boshqa analitik asboblari:* Maxsus holatlarda **spektrorometrlar** (yorug'lik spektrlari orqali tarkibni batafsil tahlil qilish uchun), yoki **massa-spektrometrlar** (yoqilg'i gazi tahlili uchun, **gaz xromatograflari** masalan,

quyosh yoqilg'isi ishlab chiqarish laboratoriyasida vodorod tozaligini o'lchash) va yuqori haroratli pechlarda **kislorod zondlari** (atmosferani boshqarish uchun) uchrashi mumkin. Ekologik datchiklar ham shu toifaga kiradi, masalan, PV panellardagi ifloslanish darajasini baholash uchun chang/zarracha datchiklari yoki quyosh to'plashga ta'sir qilishi mumkin bo'lgan namlik va ifloslantiruvchi moddalarni o'lchaydigan ob-havo stansiyasi datchiklari.

Umuman olganda, bu kimyoviy va ekologik datchiklar energetika tizimlaridagi yordamchi suyuqliklar va sharoitlar optimal bo'lishini ta'minlaydi. Quyosh qo'llanmalarida bu issiqlik tashuvchi suyuqlikning *kimyoviy barqarorligini* kuzatishni anglatishi mumkin (pH/elektr o'tkazuvchanlik orqali degradatsiyani aniqlash), *ekologik me'yorlarga rioya qilinishini* ta'minlashni anglatishi mumkin (har qanday qazilma yoqilg'ili zaxira tizimlarida emissiya datchiklari), va *samaradorlikka ta'sir qiluvchi omillarni* kuzatishni anglatishi mumkin (masalan, atmosfera tiniqligi yoki chang va ifloslantiruvchi moddalarning mavjudligi, buni mahalliy havo sifati o'lchovlaridan bilvosita baholash mumkin).

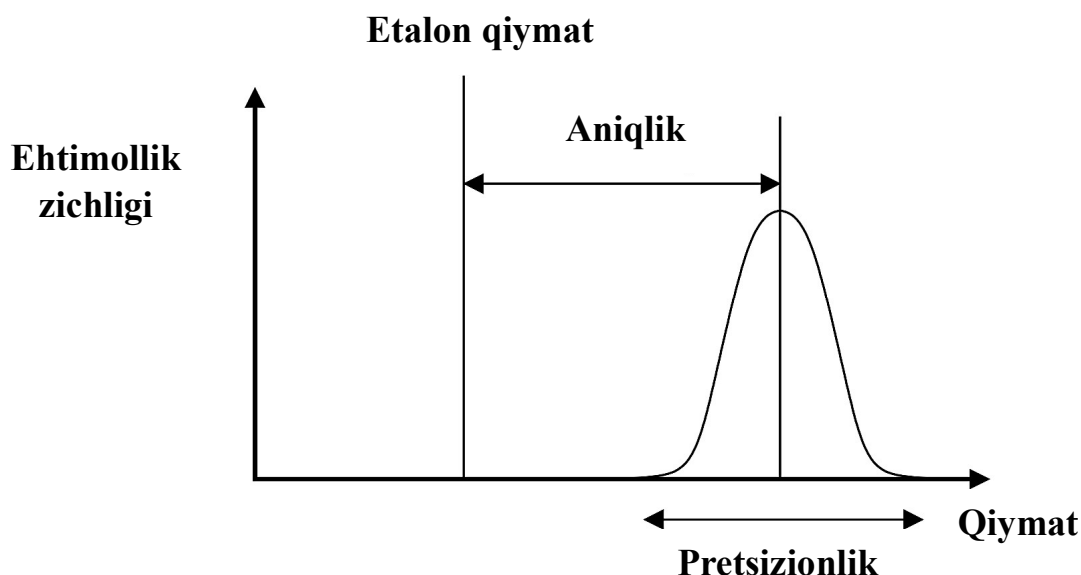
Har bir asbob va datchik umumiy tizimda aniq belgilangan vazifani bajaradi va ular birgalikda muhandislarga quyosh energiyasini konversiya jarayonini ishonch bilan **o'lchash, monitoring** qilish va **boshqarish** imkonini beradi.

2. Measurement Accuracy and Uncertainty

2.1 Izchillik, aniqlik, ajrata olish qobiliyati, takrorlanuvchanlik

O'lchovlarni baholashda bir-biriga yaqin bo'lgan bir nechta tushunchalarni farqlash muhim: **aniqlik**, **izchillik**, **ajrata olish qobiliyati** va **takrorlanuvchanlik**. Bu atamalar o'lchov sifatining turli jihatlarini ifodalaydi..

- **Aniqlik** o'lchangan qiymatning o'lchanadigan kattalikning haqiqiy yoki qabul qilingan qiymatiga qanchalik yaqin ekanini bildiradi. Aniqligi yuqori o'lchash tizimida tizimli xatolik yoki og'ish (bias) kichik bo'ladi. Masalan, agar termopara termometri haqiqiy harorat 100.0°C bo'lganda 100.0°C ko'rsatsa, u juda aniq hisoblanadi. Amaliyotda aniqlik ko'pincha xatolik (haqiqiy qiymatdan farq) sifatida yoki to'liq diapazonning (full-scale) yoxud ko'rsatishning foizi sifatida ifodalanadi. Quyosh energetikasi qo'llanmalarida o'lchangan natijani nazariy bashoratlar yoki standartlar bilan solishtirganda aniqlik juda muhim, masalan, PV stansiya ishlashini adolatli baholash uchun irradiatsiya datchigi $\pm 1\%$ aniqlikda bo'lishi talab qilinishi mumkin.
- **Izchillik** o'lchovlarning izchilligi yoki qayta-qayta o'lchaganda bir-biriga yaqin chiqishini bildiradi, ya'ni haqiqiy qiymatdan qat'i nazar, takroriy o'lchovlar bir-biriga qanchalik yaqin. U tasodifiy xatolik darajasini (sochilish, scatter) aks ettiradi. Precizionligi yuqori asbob bir xil sharoitda har safar juda o'xshash natijalar beradi. Masalan, agar piranometr doimiy quyosh nuri sharoitida 501, 500, 502 W/m^2 ko'rsatmalarini bersa (haqiqiy qiymat, deyslik, $\sim 500 \text{ W/m}^2$), unda izchillik yuqori bo'ladi (tarqalish kichik). Izchillik ko'pincha ko'rsatmalarning standart og'ishi orqali baholanadi. Muhimi, asbob precizion bo'lib, lekin aniq bo'lmasligi ham mumkin, agar u doimiy ravishda haqiqiy qiymatdan chetga chiqsa (og'ish - bias tufayli). Bu holat datchik yaxshi tayyorlangan (tasodifiy shovqin kichik), lekin kalibrlanishi buzilgan bo'lsa tez-tez uchraydi. Aksincha, o'rtacha hisobda aniq bo'lib, lekin tarqalishi katta bo'lgan asbobning precizionligi past bo'ladi. Ishonchli o'lchovlar uchun muhandislar ham yuqori izchillikni, ham yuqori aniqlikni xohlaydi. Quyosh energetikasi kontekstida izchillik kichik o'zgarishlar yoki trendlarni aniqlash uchun muhim, masalan, precizion piranometr quyosh nurlanishidagi juda kichik tebranishlarni aniqlay oladi, precizionligi past bo'lgani esa bunday tebranishlarni shovqin ichida "yashirib" yuborishi mumkin.



Rasm 10: Ehtimollik zichligi grafiği – Aniqlik va Pretsizionlikni taqqoslash

- **Ajrata olish qobiliyati (resolution)** asbob aniqlay oladigan yoki ko'rsata oladigan o'lchanadigan kattalikdagi eng kichik o'zgarishdir. Bu asbobning "nozik ajrata olish" darajasidir. Raqamli asboblarda uchun ajrata olish qobiliyati ko'pincha eng kichik razryad (least significant digit) yoki bit bilan belgilanadi (masalan, 0.01 V gacha ko'rsatadigan voltmetrning ajrata olish qobiliyati 0.01 V). Analog asboblarda bu eng kichik shkala bo'linmasi yoki strelka qalinligi va insonning ko'z bilan baholashi kabi omillar bilan cheklanadi. Kichik o'zgarishlarni ko'rish uchun yuqori ajrata olish qobiliyati kerak bo'ladi. Masalan, ma'lumot yozgich (data logger) irradiatsiyani 0.1 W/m^2 ajrata olish qobiliyatida qayd etishi mumkin. Biroq ajrata olish qobiliyatining o'zi aniqlikni kafolatlamaydi. Asbob ko'p o'nli xonalarni ko'rsatsa ham (nozik resolution), aniqligi past bo'lsa u baribir noto'g'ri bo'lishi mumkin. Amaliy tasavvur: millimetr bo'linmalari bor chizg'ich (resolution = 1 mm) bilan faqat santimetr bo'linmalari bor chizg'ichni (resolution = 10 mm) solishtirsak, birinchisi uzunlikdagi kichik farqlarni ajrata oladi. Quyosh qo'llanmalarida resolution ma'lumotning "aniq ko'rinishi"ga ta'sir qiladi: 0.1°C resolutionli harorat datchigi 1°C resolutionli datchik ko'rmaydigan juda kichik termal tebranishlarni ko'rsatadi. Biroq agar datchik aniqligi $\pm 2^\circ\text{C}$ bo'lsa, bunday o'nli xonalar ma'lum ma'noda chalg'ituvchi bo'lishi mumkin. Shuning uchun resolution aniqlik va o'lchash vazifasining ehtiyojiga mos bo'lishi kerak.
- **Takrorlanuvchanlik (repeatability)** izchillik bilan juda yaqin bog'liq, ammo u aynan bir xil asbob yoki usulning qisqa vaqt oralig'ida bir xil sharoitda bir xil natijani qayta bera olish qobiliyatini anglatadi. Agar siz bir kattalikni tez-tez, ketma-ket o'lchasangiz (bir operator, bir asbob, bir xil atrof-muhit sharoiti), ko'rsatmalar bir-biriga juda yaqin bo'lsa, o'lchovning takrorlanuvchanligi

yaxshi hisoblanadi. Qayta ishlab chiqariluvchanlik (reproducibility) esa sharoitlar o'zgarganda kelishuv darajasini bildiradi (boshqa operator, xuddi shu turdagi boshqa asbob yoki uzoqroq vaqt oralig'i va h.k.). Boshqacha aytganda, takrorlanuvchanlik = bitta sozlamada izchillik; qayta ishlab chiqariluvchanlik = turli sozlamalar bo'yicha izchillik. Yuqori takrorlanuvchanlik nazorat qilinadigan holatda tasodifiy xatolik kichik ekanini bildiradi. Masalan, irradiatsiya datchigi barqaror lampa ostiga qo'yilganda ketma-ket sinovlarda 800.5, 800.7, 800.6 W/m² ko'rsatsa, unda takrorlanuvchanlik juda yaxshi (o'zgarish atigi ~0.02%). Agar xuddi shu lampada shu modeldagi boshqa datchik ham ~800.6 W/m² ko'rsatsa, o'lchov turli asboblarda bo'yicha qayta ishlab chiqariluvchan hisoblanadi. Takrorlanuvchanlik ko'pincha qisqa muddatli ko'rsatmalarning standart og'ishi yoki oralig'i bilan miqdoriy ifodalanadi. Ko'plab asbob datasheetlarida "takrorlanuvchanlik $\pm X$ " ko'rsatkichi aniqlikdan alohida beriladi. Takrorlanuvchanlik mazmunli o'zgarishlarni aniqlash uchun zarur, masalan, siz quyosh kollektorining chiqish haroratini har soatda o'lchasangiz va har bir o'lchovning takrorlanuvchanligi $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ bo'lsa, soatlar orasidagi 1°C ko'tarilish ahamiyatli bo'ladi; ammo takrorlanuvchanlik $\pm 2^{\circ}\text{C}$ bo'lsa, 1°C o'zgarish o'lchov shovqini ichida yo'qolib ketishi mumkin.

Aniqlik va izchillik farqini grafik tarzda tushuntirish uchun ko'pincha "nishon" analogiyasi ishlatiladi. Texnik xodim quyosh elementining chiqishini bir necha marta o'lchayotgan to'rtta holatni tasavvur qiling (haqiqiy qiymat - nishon markazi):

(a) **Past aniqlik, past izchillik:** ko'rsatmalar tarqoq va haqiqiy qiymatdan uzoq (nishon atrofida keng sochilgan, markazga yaqin emas), masalan, shovqini katta bo'lgan yomon kalibrlangan irradiatsiya datchigi;

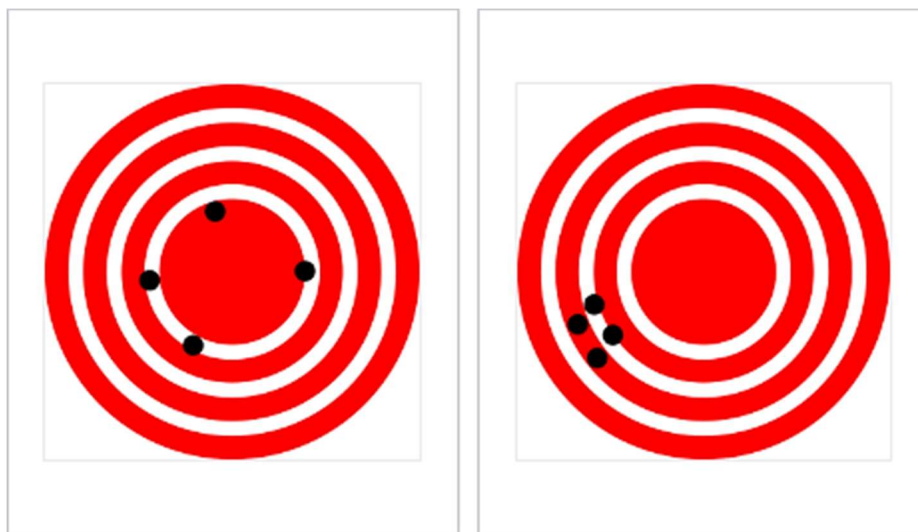
(b) **Yuqori izchillik, past aniqlik:** ko'rsatmalar zich to'plangan, lekin haqiqiy qiymatdan siljigan (markazdan chetda zich guruh), bu doimiy og'ishga ega termopara bo'lishi mumkin;

(c) **Yuqori aniqlik, past izchillik:** ko'rsatmalar o'rtacha hisobda haqiqiy qiymatga yaqin, lekin tarqalish katta (o'rtacha markaz atrofida, ammo keng sochilgan), masalan, o'rtacha kalibrlangan, lekin qisqa muddatli shovqini yuqori datchik;

(d) **Yuqori izchillik, yuqori aniqlik:** ko'rsatmalar haqiqiy qiymat atrofida zich to'plangan (markazda zich guruh), ideal holat.

Metrologiya atamalarida ISO "trueness" atamasini ko'plab o'lchovlarning o'rtacha qiymati haqiqiy qiymatga yaqinligini bildirish uchun belgilaydi (tizimli xatolik yo'qligi ma'nosida aniqlikka yaqin tushuncha), va "precision" atamasini har bir o'lchovning boshqalariga yaqinligini bildirish uchun belgilaydi (tasodifiy xatolik

kichik). Aniq o'lchash tizimi uchun ham yuqori trueness (kichik og'ish), ham yuqori izchillik (kichik sochilish) talab qilinadi.



**Presizionlik kamligi tufayli
aniqlikning kamligi**

**Presizionlik yuqori bo'lsa
ham aniqlikning kamligi**

Rasm 11: Aniqlikning kamligi – izchillik kam va ko'p bo'lgan holatda

Xulosa qilib:

- *Aniqlik* = to'g'rilik (og'ish - biasdan xoli bo'lish).
- *Izchillik* = izchillik (tasodifiy sochilishdan xoli bo'lish).
- *Ajrata olish qobiliyati* = o'lchov qadamlarining eng kichik qadami.
- *Takrorlanuvchanlik* = natijani qayta olish qobiliyati (bir xil sharoitda qisqa muddatli izchillik).

Bu omillarning barchasi ma'lumot sifatiga ta'sir qiladi. Masalan, quyosh resursini baholash kompaniyasida piranometr yuqori resolutionga ega bo'lishi kerak (irradiatsiyadagi mayda o'zgarishlarni ko'rish uchun), yuqori izchillik va takrorlanuvchanlikka ega bo'lishi kerak (haqiqiy quyosh tebranishlarini asbob shovqinidan ajratish uchun), va yuqori aniqlikka ega bo'lishi kerak (o'lchangan irradiatsiya haqiqiy quyosh kirishiga mos bo'lishi uchun, natijada energiya ishlab chiqarish prognozlari to'g'ri bo'ladi). Agar omillardan biri yetishmasa, ma'lumotning foydaliligi kamayadi, masalan, takrorlanuvchanligi past datchik soxta ogohlantirishlarni keltirib chiqarishi mumkin, va aniqligi past datchik qarorlarni noto'g'ri yo'naltirishi mumkin (masalan, PV stansiya samaradorligini noto'g'ri baholash kabi).

2.2 Xatolik turlari va noaniqlik tahlili

Hech bir o'lchov mutlaq aniq emas, barcha o'lchovlarda xatolik va noaniqlik mavjud. Muhandislar uchun xatolik manbalarini tushunish va o'lchovning umumiy noaniqligini miqdoriy baholash juda muhim.

Tizimli va tasodifiy xatoliklar

Umuman olganda, o'lchashdagi xatoliklar tizimli yoki tasodifiy turlarga bo'linadi. **Tizimli xatoliklar** (og'ishlar) takrorlanuvchi, oldindan kutiladigan chetlanishlar bo'lib, o'lchovlarning doimiy ravishda bir xil yo'nalishda noto'g'ri chiqishiga sabab bo'ladi. Bular asbob kalibrlash xatoliklari, vaqt o'tishi bilan **siljish**, ko'rsatishni doimiy ravishda og'diradigan atrof-muhit ta'sirlari yoki o'lchash usulidagi kamchiliklar sababli yuzaga kelishi mumkin. Masalan, agar termometr doimiy ravishda 1.5°C ga yuqori ko'rsatsa (ehtimol elektronika qismidagi nolga siljish – “zero-offset” tufayli), unda tizimli xatolik mavjud. Tizimli xatoliklar **aniqlikka** ta'sir qiladi, ya'ni barcha ko'rsatmalarni haqiqiy qiymatdan chetga “siljitadi”. Ularni ko'pincha kalibrlash yoki etalon standartlar bilan solishtirish orqali aniqlash va tuzatish mumkin. Quyosh energetikasi kontekstida, agar piranometr gorizontal holatda noto'g'ri tekislangan bo'lsa, u to'g'ri tekislash bilan tuzatilmaguncha har doim bir necha foizga past ko'rsatishi mumkin (tizimli og'ish). **Tasodifiy xatoliklar** esa takroriy o'lchovlarda sochilishga olib keladigan stoxastik tebranishlardir. Ular elektron zanjirlardagi shovqin, o'qish sharoitlarining o'zgaruvchanligi, kuzatuvchining baholashi yoki tabiatan oldindan aytib bo'lmaydigan har qanday ta'sir sababli yuzaga keladi. Tasodifiy xatoliklar **izchillikka** ta'sir qiladi, ya'ni alohida ko'rsatmalarni o'zgaruvchan qiladi, hatto o'rtacha qiymat baribir “nishonda” bo'lib qolishi mumkin. Masalan, elektron shovqin tok kuchi datchigining chiqishini barqaror qiymat atrofida $\pm 0.2\%$ tebratishi mumkin, yoki suyuqlik oqimidagi turbulentlik oqim o'lchagich ko'rsatishini “qaltiratishi” mumkin. Bu xatoliklarni statistik tarzda tavsiflash mumkin (standart og'ish va h.k.), lekin ularni to'liq yo'q qilib bo'lmaydi, biroq ko'p marta o'lchovlarni o'rtachalash yoki asbob konstruksiyasini yaxshilash kabi usullar bilan kamaytirish mumkin.

Shuni ham ta'kidlash kerakki, ayrim xatolik manbalarida ham tizimli, ham tasodifiy tarkib bo'lishi mumkin. **Atrof-muhit omillarida** ko'pincha shunday bo'ladi: masalan, agar tenzodatchik harorat bo'yicha kompensatsiya qilinmagan bo'lsa, atrof-havo haroratining o'zgarishi uni tizimli ravishda og'dirishi mumkin, va muhit tebranib turgani uchun tasodifiy shovqin ham kiritishi mumkin. **Asbobga oid sabablar** qatoriga gisterezis (asbob javobi oldingi ko'rsatmalarga bog'liq bo'lishi),

nochiziqlilik yoki eskirish kiradi, va bular odatda tizimli chetlanishlarni keltirib chiqaradi; hamda ajrata olish qobiliyati cheklovlari yoki ichki elektr shovqin, bular esa tasodifiy o'zgarish sifatida namoyon bo'ladi. **Kuzatuv va protsedura xatoliklari** (qo'l bilan o'lchashlarda dolzarb), masalan analog shkalani o'qishda parallaks xatoligi yoki sekundomer bilan vaqt olishdagi xatoliklar, tizimli ham bo'lishi mumkin (agar doim bir yo'nalishda og'sa) yoki tasodifiy ham bo'lishi mumkin (agar har safar turlicha bo'lsa).

Noaniqlik tahlili

“Xatolik” odatda (ma'lum yoki faraz qilingan) haqiqiy qiymat minus o'lchangan qiymat ma'nosini bildirsa, **o'lchash noaniqligi** o'lchov natijasi haqidagi shubhani rasmiy miqdoriy ifodalashdir. Haqiqiy qiymatni deyarli hech qachon mutlaq aniq bilmaganimiz uchun, o'lchangan qiymat haqida qanchalik noaniq ekanimizni ifodalaymiz. Metrologiya bo'yicha Xalqaro Lug'at (VIM) ga ko'ra, noaniqlik “o'lchanadigan kattalikka asosli ravishda tegishli deb qaralishi mumkin bo'lgan qiymatlar tarqalishini tavsiflovchi parametr”dir. Amaliyotda o'lchovni quyidagicha berish mumkin:

$$Y=y\pm U$$

bu yerda y - o'lchangan qiymat, U - kengaytirilgan noaniqlik bo'lib, u ko'pincha 95% ishonchlilik darajasida beriladi (qamrov koeffitsienti $k=2$). Masalan, quyosh irradiatsiyasi o'lchovi $500 \text{ W/m}^2 \pm 5 \text{ W/m}^2$ ($k=2$ da, ya'ni haqiqiy qiymat 495-505 W/m^2 oralig'ida bo'lishiga taxminan 95% ishonamiz) tarzida berilishi mumkin.

U ni aniqlash jarayoni **noaniqlik tahlili** bo'lib, u barcha sezilarli noaniqlik manbalarini aniqlash va ularni birlashtirishni o'z ichiga oladi. Bu manbalar quyidagilarni qamrab olishi mumkin:

- **Asbob kalibrlash noaniqligi:** Kalibrlashdan keyin ham etalonning o'zida ma'lum noaniqlik bo'ladi, va asbob kalibrlashlar oralig'ida og'ishi mumkin. Masalan, $\pm 1^\circ\text{C}$ gacha kalibrlangan termopara shu qiymatni tarkibiy noaniqlik sifatida kiritadi.
- **Ajrata olish qobiliyati noaniqligi:** Agar voltmeter 0.1 V gacha yaxlitlab ko'rsatsa, haqiqiy qiymatni shu resolutionga yaxlitlashdan keladigan ichki ± 0.05 V (bir tekis taqsimot) noaniqlik mavjud bo'ladi.
- **Atrof-muhit ta'sirlari:** masalan, asbobning harorat koeffitsientlari, agar asbob kalibrlangan haroratdan boshqa haroratda ishlatilsa, ma'lum spetsifikatsiya (deylik $0.01\%/^\circ\text{C}$) qo'shimcha noaniqlik kiritishi mumkin. Quyosh fermalarida

datchik harorati ta'siri sezilarli; piranometr ko'rsatishlari datchik harorati bilan siljishi mumkin, shuning uchun buni hisobga olish kerak bo'ladi.

- **Takrorlanuvchanlik (tasodifiy) noaniqligi:** O'lchovni takrorlaganda kuzatiladigan o'zgaruvchanlik. Agar siz PV modulining kuchlanishini 10 marta o'lchasangiz va standart og'ish, masalan, 0.2 V bo'lsa, bu noaniqlikka hissa qo'shadi. Statistik "Type A" baholash buni qamrab oladi.
- **Usul va hisoblash noaniqligi:** Masalan, agar siz ikki bosim va bitta harorat o'lchovidan oqim sarfini hisoblayotgan bo'lsangiz (diafragma plastinali oqim o'lchagichdagi kabi), kirish kattaliklaridagi noaniqliklar formula orqali natijaga tarqaladi.

Noaniqlik budjeti - bu har bir noaniqlik manbasi, uning baholangan kattaligi (ko'pincha standart og'ish sifatida) va yakuniy natijaga qo'shadigan hissasini ko'rsatadigan tuzilmali jadvaldir. Manbalar odatda Type A (o'lchangan ma'lumotlarning statistik tahlili orqali baholanadi) yoki Type B (boshqa usullar bilan, masalan ishlab chiqaruvchi spetsifikatsiyasi yoki referens ma'lumotlar orqali baholanadi) toifalariga ajratiladi. Masalan, shtangentserkul bilan quyosh paneli uzunligini o'lchashni olaylik: noaniqlik budjetidagi manbalar qatoriga shtangentserkul kalibrlash xatoligi, shtangentserkul eng kichik bo'linma qiymati (0.01 mm gacha o'qish), jag'lar mutlaq perpendikulyar bo'lmaganda kosinus xatoligi, termik kengayish (panel yoki shtangentserkul harorati standartdan farq qilsa), va o'lchash usulining takrorlanuvchanligi kirishi mumkin. Har biri (mm da) baholanadi va (agar mustaqil deb qaralsa) birlashtiriladi (odatda kvadratlar yig'indisining kvadrat ildizi usuli bilan), natijada umumiy standart noaniqlik olinadi. Yakunda kerakli ishonchlilik darajasi uchun qamrov koeffitsienti qo'llanadi va kengaytirilgan noaniqlik olinadi (odatda 95%). Formulada, agar bizda mustaqil noaniqlik tarkiblari $u_1, u_2, \dots, u_n$ (standart og'ishlar sifatida) bo'lsa, birlashtirilgan standart noaniqlik u_c quyidagicha:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$$

Agar 95% ishonchlilik istasak va normal taqsimotni faraz qilsak, $U = 2 \cdot u_c$ tarzida beramiz (chunki $k=2$ normal taqsimot uchun ~95% ni beradi).

Quyosh sohasidagi amaliy misol uchun: faraz qilaylik, PV modul samaradorligini tushayotgan irradiatsiya I va chiqish quvvati P ni o'lchab aniqlaymiz. Noaniqliklar quyidagicha bo'lishi mumkin: $u(P)$ vatmetr (wattmeter) dan (masalan, $\pm 2\%$), $u(I)$ piranometr dan (masalan, kalibrlashdan keyin $\pm 3\%$), hamda piranometrni tekislashdagi noaniqliklar (quyosh burchagi to'liq hisobga olinmasa kosinus xatoligi) va harorat farqlari (chunki modul samaradorligi haroratga bog'liq,

haroratni mutlaq aniq o'lchamaslik uchun ham noaniqlik kiritilishi mumkin). Bular birlashtiriladi va samaradorlik hisobida noaniqlik olinadi. Natija masalan shunday ko'rinishda bo'lishi mumkin: "O'lchangan modul samaradorligi = $19.5\% \pm 0.7\%$ (95% ishonchlilik)". Bu natija haqiqiy samaradorlik ehtimol qaysi oraliqda ekanini ko'rsatadi va barcha hissa qo'shuvchi noaniqliklar mavjudligini ochiq tan oladi..

Xatolik va noaniqlik

Shuni farqlash kerakki, xatolik bitta o'lchovning haqiqiy qiymatdan chetlanishidir (konseptual ravishda, agar haqiqiy qiymat ma'lum bo'lsa), noaniqlik esa biz taqdim etayotgan qiymat haqidagi miqdoriy "shubha"dir. Odatda biz haqiqiy xatolikni bilmaymiz, lekin noaniqlikni baholashimiz mumkin. Yaxshi o'lchash amaliyoti tizimli xatoliklarni (kalibrlash va tuzatishlar orqali) va tasodifiy xatoliklarni (asbob va usullarni yaxshilash orqali) kamaytirish, so'ng qolgan noaniqlikni ochiq bayon qilishdan iborat. Xalqaro ISO GUM (Guide to Uncertainty in Measurement) da ta'kidlaganidek, "*noaniqlik - shubhaning miqdoriy ifodasidir*".

Noaniqlikni tushunish qaror qabul qilish uchun juda muhim. Quyosh energetikasi loyihalarida, masalan, resurs baholashda bir hududdagi yillik quyosh irradiatsiyasi $2100 \pm 50 \text{ kWh/m}^2$ ekanligi aniqlanishi mumkin. Bu noaniqlik loyihaaning moliyaviy modellari va risk baholashiga ta'sir qilishi mumkin. Laboratoriyada, agar yangi quyosh elementining samaradorligi kichik noaniqlik bilan o'lchansa, "dunyo rekordi" samaradorlikni ishonchliroq da'vo qilish mumkin bo'ladi; agar noaniqlik katta bo'lsa, natija oldingi rekordlardan farq qilmasligi ham mumkin. Noaniqlik tahlili qaysi joyda yaxshilash kerakligini ham ko'rsatadi, masalan, agar quyosh kollektorini sinashda noaniqlikning eng katta ulushi oqim sarfi o'lchagichdan kelayotgan bo'lsa, bu tarkibni kamaytirish uchun yaxshiroq oqim sarfi o'lchagichga yoki kalibrlashga sarmoya kiritish mumkin.

Xulosa qilib aytganda, *tizimli xatoliklar* aniqlikni pasaytiradi (va tuzatilishi yoki hisobga olinishi kerak), *tasodifiy xatoliklar* izchillikni cheklaydi (va o'rtachalash yoki yaxshiroq asboblarni bilan yumshatilishi mumkin), va to'liq noaniqlik tahlili barcha ta'sirlarni birlashtirib natija uchun ishonchli intervalni beradi. Muhandislik metrologiyasidagi maqsad imkon qadar xatoliklarni kamaytirish va qolgan noaniqlikni ishonchli tarzda miqdoriy ifodalashdir, shunda muhandislar va manfaatdor tomonlar o'lchovlarga bo'lgan ishonch darajasini bilgan holda ongli qarorlar qabul qila oladi.

2.3 Asboblarni kalibrlash asoslari

Nega kalibrlash zarur

Asboblarni qutidan chiqqan holatda kamdan-kam mukammal bo'ladi va vaqt o'tishi bilan ularning xususiyatlari o'zgarishi mumkin. **Kalibrlash** - asbobni shunday sozlash jarayonidir, u namunaga (sample) nisbatan qabul qilinadigan diapazonda natija bersin. Bu odatda belgilangan sharoitlarda asbobni aniqligi yuqoriroq bo'lgan etalon (reference) bilan solishtirish va kerakli tuzatish yoki sozlash miqdorini aniqlash orqali bajariladi. Kalibrlash bir nechta maqsadga xizmat qiladi: u milliy/xalqaro standartlarga *metrologik kuzatuvchanlikni* (traceability) ta'minlaydi, ko'rsatmalar **aniq bo'lishini** kafolatlaydi, turli asboblarni va laboratoriyalarni bo'yicha o'lchovlarni bir xil qiladi va natijalarga ishonchni oshiradi. Aslida, kalibrlash quyidagi savolga javob beradi: *“Mening asbobim qanchalik noto'g'ri ko'rsatmoqda va men buni qanday tuzatishim yoki hisobga olishim mumkin?”*

Amaliyotda kalibrlash asbobga ma'lum kirish qiymatini (standartni) berish va asbob chiqishini qayd etishni o'z ichiga olishi mumkin. Masalan, termopara termometrini kalibrlash uchun 0.00°C muz nuqtasi yacheykasi (ice point cell) va 100°C dagi qaynash nuqtasi yoki quruq blokli kalibrator (dry block calibrator) ishlatilishi mumkin, bunda termopara ko'rsatishi ma'lum haroratlar bilan solishtiriladi. Har qanday chetlanishlar qayd etiladi va sozlash yoki kalibrlash egri chizig'i tuziladi. Ba'zi asboblarni fizik sozlashga ruxsat beradi (masalan, vintni burash, dasturda offset kiritish), shunda ular kalibrlash nuqtalarida to'g'ri ko'rsatadi. Boshqalari esa o'zgartirilmaydi, lekin foydalanuvchi ko'rsatmalarni matematik tarzda tuzatishi uchun xatoliklarni bayon qiladigan **kalibrlash hisoboti** yoki sertifikatini bilan birga beriladi.

Kalibrlashda metrologik kuzatuvchanlik va standartlar

Muhokama qilinganidek, kalibrlash asbobni yuqori darajadagi standartlar bilan bog'laydi. To'g'ri kalibrlash o'zi ham (noaniqligi kichikroq bo'lgan holda) kalibrlangan etalon standartlar yordamida bajariladi, va aynan shu uzluksiz zanjir o'lchovlarga ishonchlilik beradi. Masalan, maydondagi piranometr kalibrlash laboratoriyasiga yuborilishi mumkin, u yerda u Quyosh irradiatsiyasi bo'yicha *World Radiometric Reference* ga (birlamchi standart) bevosita metrologik izchil bo'lgan etalon piranometr bilan solishtirib sinovdan o'tkaziladi. Kalibrlash sertifikatida ko'pincha kalibrlash noaniqligi va sharoitlar (masalan, 1000 W/m² da kalibrlangan, atrof-muhit 25°C) ko'rsatiladi. Kalibrlangan asbobdan foydalanganda, shu zanjir

orqali SI birliklariga (vatt, volt va h.k.) metrologik izchil bo'lgan o'lchovlarni taqdim etish mumkin..

Amaliy kalibrlash (tartib) - Kalibrlash odatda quyidagi tartib bo'yicha bajariladi:

1. **Kalibrlashdan oldingi tekshiruv:** Asbob shikastlanmaganini tekshirish mumkin, kerak bo'lsa qizdirib olish (warm-up) bajariladi, va mos bo'lsa nolga keltiriladi.
2. **Ma'lum kirish qiymatlarini berish:** Asbobning ish diapazonini qamrab oladigan qiymatlar oralig'ida ma'lum kirishlar beriladi. Bu elektr signallari bo'lishi mumkin (voltmetr uchun kalibrator orqali aniq kuchlanishlar beriladi), yoki fizik sharoitlar bo'lishi mumkin (harorat datchigi uchun uni barqaror harorat vannalariga joylashtirish; bosim o'lchagich uchun esa ma'lum bosimlar hosil qiladigan dead-weight tester ishlatish).
3. **Ko'rsatmalarni haqiqiy qiymatlar bilan solishtirib qayd etish:** Asbob ko'rsatishi yozib olinadi va etalon qiymat bilan solishtiriladi.
4. **Xatoliklarni hisoblash:** Farq (yoki nisbat va h.k.) har bir nuqtada asbob xatoligini beradi. Ko'pincha xatolik doimiy bo'lmasa, kalibrlash egri chizig'i moslashtiriladi.
5. **Sozlash (ruxsat etilgan bo'lsa):** Agar asbob sozlashga imkon bersa (ko'plab zamonaviy qurilmalarda ichki kalibrlash rejimi bo'ladi), xatoliklarni minimallashtirish uchun u sozlanadi va keyin qayta tekshiriladi. Ba'zi kalibrlashlar esa sozlashsiz, faqat xatolikni hujjatlashtiradi (ko'proq barqaror asboblarda uchun bu odatiy, tez-tez sozlab turishdan qochish uchun).
6. **Hisobot va sertifikatlash:** Natijalar, noaniqlik, metrologik kuzatuvchanlik, sana va keyingi kalibrlash muddati ko'rsatilgan kalibrlash sertifikati beriladi..

Kalibrlash davriyligi asbob qanchalik barqaror ekaniga va o'lchovlar qanchalik kritik ekaniga bog'liq. Ba'zi quyosh stansiyasi datchiklari har yili kalibrlanishi mumkin (masalan, piranometrlar uchun ko'pincha har yili qayta kalibrlash yoki kamida har ikki yilda bir marta verifikatsiya qilish tavsiya etiladi). Kritik laboratoriya asboblari esa sinovlar to'plamidan oldin va keyin kalibrlanishi mumkin.

Kalibrlashning o'lchov ishonchliligiga ta'siri

Asbob to'g'ri kalibrlanganda, uning tizimli xatoligi ma'lum bo'ladi va tuzatish kiritish mumkin bo'ladi, hamda noaniqligi kamayadi. Bu o'lchov natijalariga bo'lgan ishonchni keskin oshiradi. Masalan, kalibrlanmagan bosim o'zgartirgichda noma'lum offset bo'lishi va ishlab chiqaruvchi ko'rsatgan aniqlik $\pm 2\%$ FS bo'lishi

mumkin. Kalibrlashdan keyin, masalan, unda +1.0 psi og'ish (bias) borligini aniqlab, uni dastur orqali tuzatishingiz mumkin bo'ladi, va qolgan noaniqlik $\pm 0.5\%$ FS gacha tushishi mumkin (chunki kalibrlash jarayoni uning xatti-harakati haqidagi bilimni ham aniqroq qiladi). Endi siz, masalan, quyosh issiqlik konturida 50.0 psi ni o'lchasangiz, haqiqiy bosim 50.0 ± 0.25 psi atrofida ekaniga ishonishingiz mumkin bo'ladi, ± 2 psi o'rniga bu ishonchlilik bo'yicha katta yaxshilanishdir.

Quyosh resursini o'lchashda **asboblarni kalibrlash noaniqlikni minimallashtirish va ma'lumotlar yaxlitligini ta'minlash** uchun zarur. Masalan, quyosh irradiatsiyasi datchigidagi kichik noto'g'ri kalibrlash PV stansiya uchun yillik energiya ishlab chiqarish (energy yield) bahosida katta xatolikka olib kelishi mumkin. Bu datchikni xalqaro standartlar (masalan, World Meteorological Organization protokollari) bo'yicha kalibrlash orqali ma'lumotlarning banklar va investorlar uchun ishonchliligi (bankability) oshadi (moliyalashtiruvchilar o'lchovlarga ishonadi). Haqiqatan ham, PV monitoringi uchun IEC 61724-1 kabi standartlar Class A piranometrlar uchun kalibrlash noaniqligi $\leq 2\%$ bo'lishini talab qiladi. Muntazam **qayta kalibrlash** vaqt o'tishi bilan datchik driftini ham hisobga oladi, chunki ko'plab datchiklar asta-sekin o'zgaradi (masalan, quyosh datchiklari UV ta'siri tufayli degradatsiyaga uchrashi mumkin). Qayta kalibrlash ularni me'yoriga qaytaradi yoki hech bo'lmaganda qanchaga og'ib ketganini miqdoriy baholaydi, shunda ma'lumotlar tuzatilishi mumkin.

Kalibrlash misoli - piranometr

Piranometr (global quyosh irradiatsiyasini o'lchaydi) odatda $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ birlikdagi sezgirlikka ega bo'ladi. Vaqt o'tishi bilan uning sezgirligi qora qoplamaning qarishi sababli siljishi mumkin. Kalibrlashda piranometr etalon asbob yoniga, bir xil quyosh ostiga joylashtiriladi va uning ko'rsatishi solishtiriladi. Agar avval u $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ uchun 10 mV chiqish bergan bo'lsa (sezgirlik $10 \mu\text{V}$ per W/m^2), va hozir aynan shu irradiatsiyada 9.8 mV bersa, kalibrlash uning sezgirligini $9.8 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ga yangilaydi. Shu yangi koeffitsientni qo'llash keyingi ko'rsatmalarni tuzatadi. Kalibrlash sertifikatida, masalan, "asbob 2% past ko'rsatadi; ko'rsatmalarga 1.02 koeffitsientini qo'llang" kabi yozuv bo'lishi mumkin va noaniqlik, masalan, 0.5% bo'lishi mumkin. Shunday kalibrlashdan so'ng piranometr ma'lumotlari aniqroq bo'ladi, va shu ma'lumotlardan foydalanadigan performance ratio yoki samaradorlik hisoblari ham aniqroq bo'ladi.

Kalibrlash ierarxiyasi va standartlarga muvofiqlik

Ko'plab sohalar standart kalibrlash amaliyotlariga amal qiladi (masalan, kalibrlash uchun ISO 17025 akkreditatsiyadan o'tgan laboratoriyalar). Quyosh sanoatida rasmiy ishlash kafolatlari yoki ilmiy nashrlarda ishlatiladigan ma'lumotlar uchun standartlarga (ISO, ASTM, IEC va h.k.) muvofiqlik ko'pincha talab etiladi. Masalan, quyosh issiqlik tajribasida harorat datchiklarini ISO/IEC 17025 akkreditatsiyali kalibrlash orqali tekshirtirish, sharhlovchilar yoki buyurtmachilarga harorat ma'lumotlari ishonchli ekanini ko'rsatadi. **Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi** shuni ta'kidlaydiki, asbobingiz milliy standartlargacha bo'lgan zanjir bo'yicha kalibrlansa, o'lchovlaringiz dunyo bo'yicha taqqoslanadigan bo'ladi. Turli mamlakatlardagi ikki laboratoriya quyosh elementi samaradorligini o'lchaganda, agar ikkalasi ham standartlarga metrologik izchil kalibrlangan asboblardan foydalansa (masalan, milliy metrologiya instituti tomonidan kalibrlangan etalon hujayralar), ular bir-birining natijalariga ishonishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, kalibrlash o'lchov sifati uchun investitsiyadir. U **tizimli xatolikni yo'q qiladi yoki miqdoriy baholaydi**, shu orqali aniqlikni yaxshilaydi, va metrologik kuzatuvchanlik orqali o'lchovlarning ishonchliligini mustahkamlaydi. Yaxshi kalibrlangan asbob muhandislarga kuzatilayotgan chetlanishlar haqiqiy ekaniga (noto'g'ri ko'rsatadigan qurilma artefakti emasligiga) va boshqaruv qarorlari (masalan, jarayon haroratini sozlash) to'g'ri ma'lumotlarga tayanganiga ishonch beradi. Quyosh energetikasi va boshqa sohalarda muntazam kalibrlash va metrologik standartlarga rioya qilish oddiy byurokratik qadamlar emas, balki *o'lchangan ma'lumot real jarayonni aks ettirishini* ta'minlaydigan asosiy amaliyotlardir, va bu ishonchli ma'lumotlarga tayangan muhandislik xulosalari hamda innovatsiyalar uchun zamin yaratadi.

3. Haroratni o'lchash texnikalari

3.1 Termoparalar, RTDlar va termistorlar

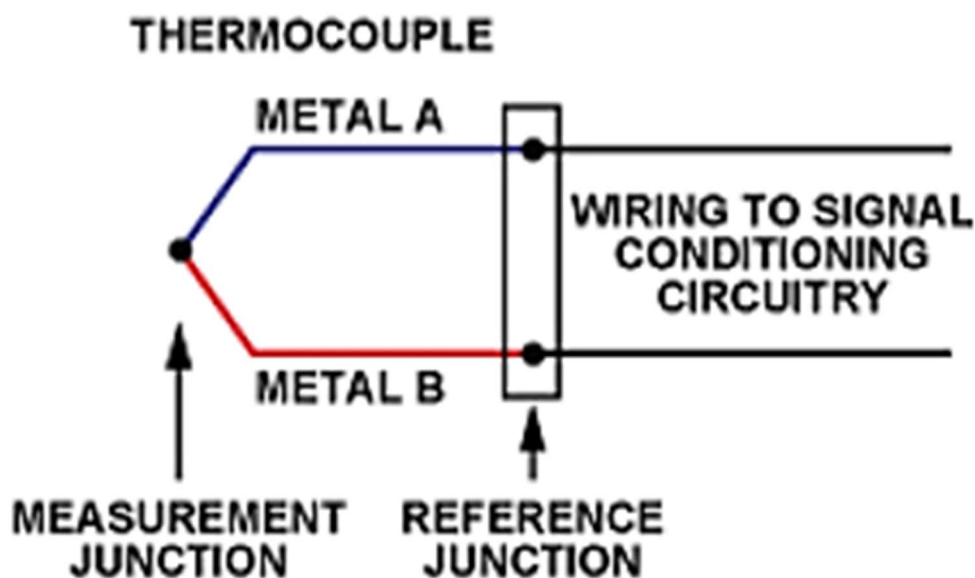
Termopara uchi birlashtirilgan ikki xil metall simdan iborat bo'ladi; agar bu birikma (junction) boshqa uchlarga nisbatan boshqa haroratda bo'lsa, haroratlar farqiga proporsional bo'lgan kichik kuchlanish hosil bo'ladi (Zebek effekti).



Rasm 12: Termopara datchigi



Rasm 13: RTD datchigi

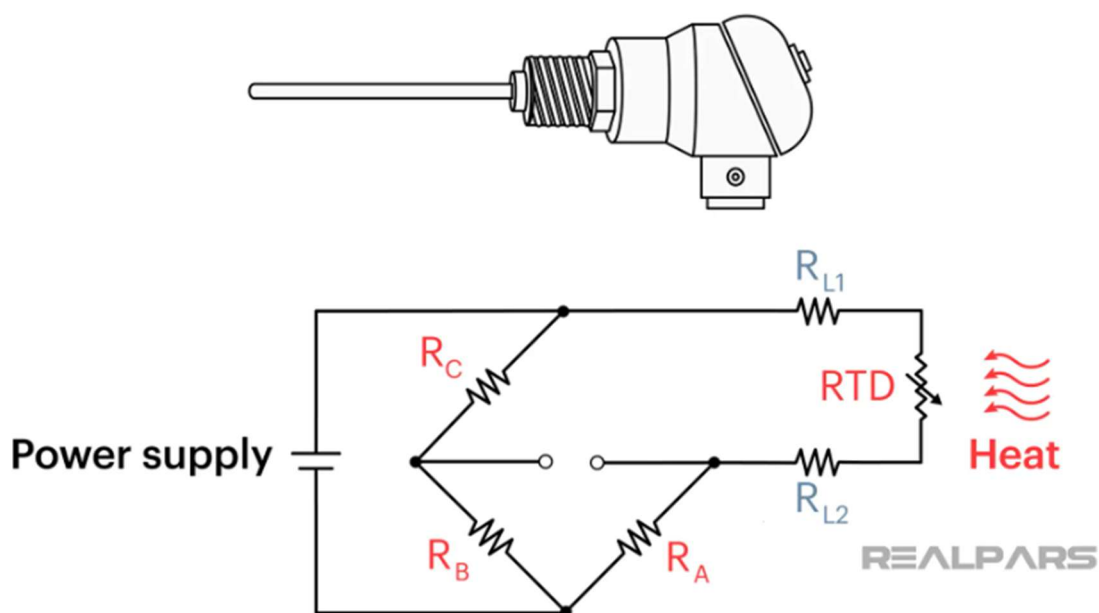


Rasm 14: Termopara sxemasi

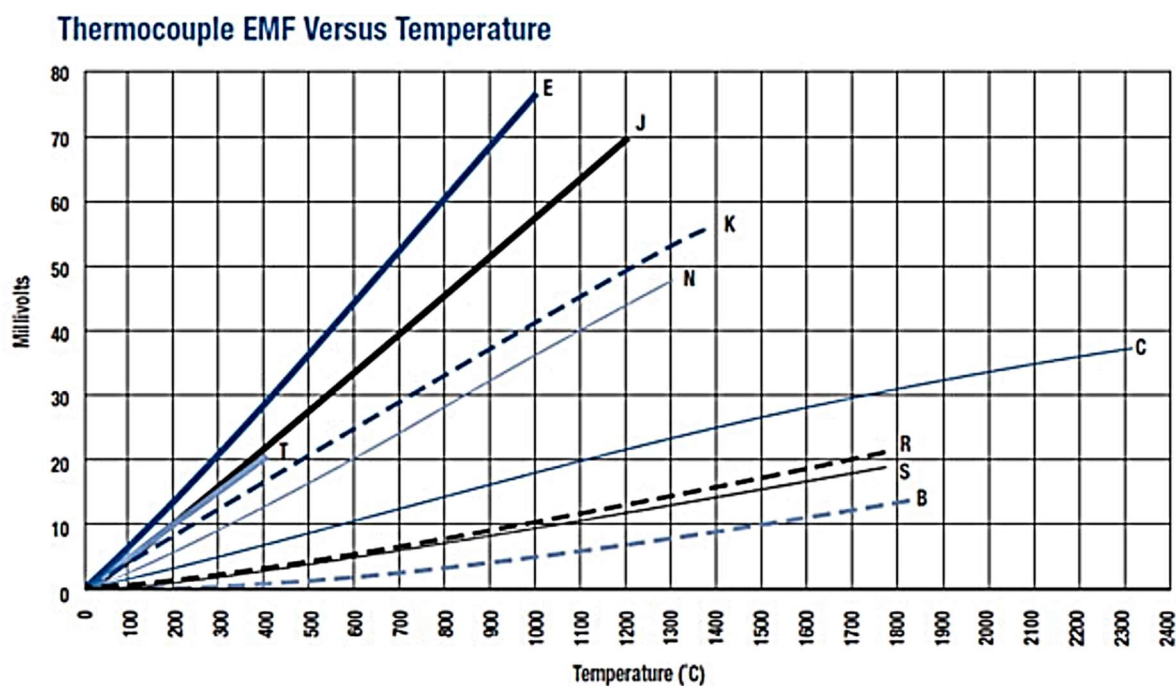
Bu termoelektr kuchlanish odatda har bir daraja uchun mikrovoltlar tartibida bo'ladi, shuning uchun termoparalar millivolt darajasidagi signallarni hosil qiladi va kuchaytirishni talab qiladi. **Qarshilikli harorat datchiklari (RTDlar)** metallning elektr qarshiligi harorat bilan oldindan aytiladigan tarzda o'zgarishi prinsipiga asoslanadi. Platinali RTD (odatda Pt100 bo'lib, 0 °C da 100 Ω) harorat oshgani sari qarshiligini deyarli chiziqli oshiradi (musbat harorat koeffitsienti); uning qarshiligini o'lchash orqali haroratni aniqlash mumkin. **Termistorlar** odatda yarimo'tkazgich metall oksidlaridan tayyorlanadigan, haroratga sezgir rezistorlar bo'lib, ular harorat bilan qarshilikning katta o'zgarishini beradi (RTDlarga nisbatan qiyalik ancha katta), biroq bu torroq diapazonda sodir bo'ladi. Termistorlarning aksariyati **NTC (Negative Temperature Coefficient)** bo'ladi, ya'ni harorat oshgani sari qarshilik eksponensial tarzda kamayadi va atrof-muhit haroratlari yaqinida haroratning kichik oshishi qarshilikning katta kamayishiga olib keladi. Shuning uchun termistorlar cheklangan diapazonda (ko'pincha 50 °C dan 150 °C gacha) juda yuqori sezgirlikka ega bo'ladi (odatda har bir °C uchun o'nlab yoki yuzlab om).

Termoparalar harf bilan belgilangan turli turlarda bo'ladi (masalan, **K turi:** Xromel-Alumel, **J turi:** Temir-Konstantan, **T turi:** Mis-Konstantan, **R/S turlari:** Platina-Rodiy qotishmalari va h.k.), va har birining ish diapazoni turlicha bo'ladi. K va J kabi bazaviy metall turlari taxminan -200 °C dan 700-1260 °C gacha diapazonni qamrab oladi, qimmatbaho metall turlari (R, S, B) esa ~1600-1700 °C gacha o'lchay oladi. K turi (Nikel-Xrom/Nikel-Alyuminiy) eng ko'p uchraydigan turlardan biri

bo'lib, taxminan $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $+1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha ishlaydi va sezgirligi $\sim 41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ atrofida.



Rasm 15: RTD datchikni o'lchash sxemasi (manba:REALPARS)



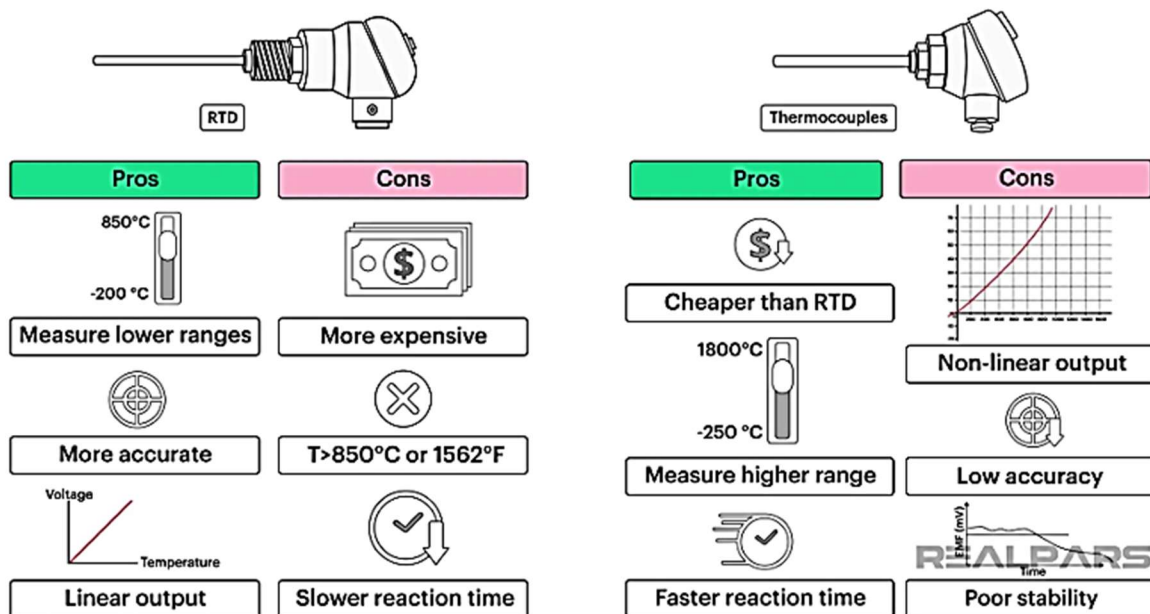
Rasm 16: K-turdagi Termopara: Kuchlanish vs Temperatura

Katta diapazonlarda termopara chiqishi nochiqli bo'ladi; kichik diapazonlarda uni taxminan chiziqli deb qarash mumkin, lekin odatda kuchlanishni haroratga aylantirish uchun polinom ko'rinishidagi konversiya yoki qidiruv jadvallari (NIST/IEC 60584 bo'yicha standartlashtirilgan) ishlatiladi. RTDlar odatda yuqori tozalikka ega platindan tayyorlanadi (chunki uning qarshilik-harorat xatti-harakati

barqaror va deyarli chiziqli). Standart platinali RTDlar (IEC 60751 Class B bo'yicha Pt100) taxminan $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha diapazonda juda yuqori aniqlik bilan o'lchaydi (o'qishning $\pm 0.1\%$ i yoki undan ham yaxshiroq). RTDlarning mutlaq sezgirligi termistorlarga qaraganda pastroq (Pt100 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da har bir $^{\circ}\text{C}$ uchun taxminan $0.385\text{ }\Omega$ ga o'zgaradi), biroq ular juda barqaror va qayta ishlab chiqariluvchan bo'ladi. Termistorlar keramika yarimo'tkazgich materiallardan (marganes, nikel, kobalt va h.k. oksidlar aralashmalari) tayyorlanadi va ko'pincha donacha (bead) yoki disk ko'rinishida bo'ladi. Ular odatda $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha (ba'zi maxsus turlari $250\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha) diapazonni qamrab oladi va shu diapazonda juda yuqori sezgirlikka ega bo'ladi. Biroq termistorlar kuchli noxiziq bo'ladi (qarshilik eksponensial egri chiziq bo'yicha o'zgaradi) va aniq qo'llash uchun chiziqlashtirish usullari yoki kalibrlashni talab qiladi.

Quyosh va energetika tizimlaridagi qo'llanish holatlari

- **Quyosh issiqlik tizimlari:** Termoparalar konsentratsiyalangan quyosh energiyasi (CSP) stansiyalarida qabul qilgich (receiver) quvuri yoki eritilgan tuz (molten salt) haroratini kuzatish kabi **yuqori haroratli o'lchovlarda** keng qo'llaniladi, chunki ular yuzlab $^{\circ}\text{C}$ ga chidamli (hatto K yoki N turi uchun $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha). Masalan, K turi yoki N turi termoparalar quyosh nov maydonidan issiqlik uzatuvchi suyuqlikning chiqish haroratini ($\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) yoki markaziy qabul qilgich (central receiver) haroratini ($\sim 500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$) o'lchaydi, bunday joylarda RTDlar o'z diapazonidan chiqib ketadi. **RTDlar** esa aksincha, quyosh issiqlik konturlarining **o'rtacha harorat diapazonlarida** ko'pincha qo'llaniladi, masalan, issiqlik almashinuvi samaradorligini boshqarish uchun $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha suv yoki moy haroratini yuqori aniqlikda o'lchashda. Quyosh suv isitish tizimlarida ($\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) platinali RTD datchiklari (Pt100/Pt1000) yoki hatto termistorlar kollektor chiqish harorati va akkumulyator (storage) bak haroratini kuzatishi mumkin, bunda aniqlik va narx o'rtasida muvozanat tanlanadi.



Rasm 17: RTD va Termoparani taqqoslash (manba: REALPARS)

- **Akkumulyator paketlari:** Akkumulyatorni boshqarish tizimlari odatda elementlar (cell) va paket haroratlarini kuzatish uchun **NTC termistorlardan** foydalanadi. Termistorlarning kichik o'lchami va xona harorati atrofida yuqori sezgirliigi ularni yuklama (load) yoki zaryad paytida litiy-ion elementining juda kichik harorat ko'tarilishini aniqlash uchun juda qulay qiladi. Ular arzon va element bilan bevosita kontaktda joylashtirilishi mumkin, bu esa qizib ketish holatlariga tez javob berishni ta'minlaydi. Ba'zi holatlarda kengroq diapazonda yuqori aniqlik kerak bo'lsa, raqamli IC harorat datchiklari yoki RTDlar qo'llanilishi mumkin, lekin narx va soddalik sababli akkumulyatorlarda eng ko'p uchraydigani termistorlardir.
- **Atrof-muhit monitoringi:** Atrof-havo yoki muhit haroratini o'lchash uchun (masalan, quyosh stansiyasidagi ob-havo stansiyalari) **RTDlar yoki termistorlar** keng qo'llaniladi. Stevenson qutilarida yoki himoyalangan korpuslarda o'rnatilgan RTDlar (Pt100, Pt1000) PV yoki quyosh issiqlik tizimlari ishini monitoring qilish uchun aniq va barqaror havo harorati ko'rsatmalarini beradi. Termistorlar (to'g'ri chiziqlashtirilgan bo'lsa) ham meteorologik datchiklarda atrof-havo haroratini o'lchashda qo'llanilishi mumkin va ko'pincha ekologik ma'lumotlarni yozib borish (data logging) uchun raqamli harorat/nisbiy namlik (RH) zondlarida uchraydi. Termoparalar bilan solishtirganda, atrof-muhit monitoringida RTDlar va termistorlar afzal ko'riladi, chunki $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha diapazonda ularning aniqligi yuqoriroq (termoparalarning $\pm 1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ noaniqligi mayda iqlim o'lchovlari uchun nisbatan katta bo'ladi). Termoparalar tuproq harorati profillarini

o'lchash kabi maxsus holatlarda (katta diapazon kerak bo'lsa) uchrashi mumkin, lekin odatiy atrof-muhit datchiklarida, odatda, kamroq qo'llaniladi.

Sezgirlik va aniqlik bo'yicha mulohazalar

Termoparalar harorat **diapazoni eng keng** va javob tezligi eng yuqori (kichik birikmalar <1 s da javob berishi mumkin), lekin ushbu datchiklar ichida aniqligi eng past (odatda $\pm 1-2$ °C yoki o'qishning 0.5% i). Ular etalon birikma (reference junction) uchun ehtiyotkor kompensatsiyani talab qiladi. RTDlar **yuqori aniqlik** va barqarorlikni beradi (yaxshi sanoat RTDlari uchun ± 0.1 °C dan ± 0.5 °C gacha aniqlik) va chiqishi ancha chiziqli, biroq termoparalarga nisbatan mo'rtroq va qimmatroq bo'ladi.

Termistorlar arzon narxda juda **yuqori sezgirlikni** beradi (tor diapazonlarda millidaraja o'zgarishlarni ham ajrata oladi), biroq ularning kuchli nochiziqliligi va o'lchash toki sababli o'z-o'zidan qizishi xatolik kiritishi mumkin. Amaliyotda muhandislar ko'pincha -200 dan 300 °C gacha diapazonda aniq o'lchovlar uchun RTDlarni tanlaydi (masalan, quyosh issiqlik akkumulyator bak haroratini 0.1 K aniqlikda kuzatish), juda yuqori yoki tez o'zgaradigan haroratlar uchun termoparalarni tanlaydi (masalan, qabul qilgich quvuri sirtida yoki power tower pechi ichida, bu yerda bir necha daraja aniqlikdan voz kechish mustahkam datchik evaziga qabul qilinadi), va lokal yoki elektron qo'llanmalar uchun termistorlarni tanlaydi (masalan, akkumulyator yoki elektronika harorati, bu yerda diapazon cheklangan, lekin narx va o'lcham kritik). Jadvalda odatiy diapazonlar va xususiyatlar jamlangan:

Jadval: Keng qo'llaniladigan harorat datchiklarini taqqoslash

Datchik	Odatdagi diapazon	Aniqlik (odatda)	Javob vaqti	Asosiy xususiyatlar
Termopara	-200 dan 1700 °C gacha (turiga bog'liq)	$\pm 1-2$ °C (kalibrlash va CJC talab qiladi)	Tez (kichik birikmada sub-sekund)	O'zidan signal hosil qiladi; juda mustahkam; sezgirlik past ($\sim 10-60 \mu V/^{\circ}C$); sovuq birikma kompensatsiyasi kerak.

Platinali RTD	-200 dan 650 °C gacha (Pt100 IEC 60751)	$\pm 0.1-0.5$ °C (yuqori izchillik)	O'rtacha (zond ko'rinishida 1-10 s)	Diapazonda juda chiziqli; barqarorligi juda yaxshi; qo'zg'atish toki kerak; termoparadan qimmatroq.
Termistor (NTC)	-50 dan 150 °C gacha (odatda)	$\pm 0.2-1.0$ °C (kalibrlash yoki chiziqlilashtiri shdan keyin)	Tez (0.5-5 s, kichik bead)	Sezgirligi juda yuqori ($\sim -4\%/^{\circ}\text{C}$ 25 °C yaqinida); arzon; kuchli nochiziqli; tok ostida o'z-o'zidan qizishi mumkin.

3.2 Kontaktsiz harorat datchiklari (IR termometrlar, pirometrlar, termal tasvirlash)

Termopara va RTD kabi kontakt datchiklari obyektga fizik tarzda tegishi kerak, bu esa har doim ham mumkin bo'lmaydi (harakatlanayotgan, juda issiq yoki uzoqdagi nishonlar uchun). **Kontaktsiz harorat datchiklari** haroratni sirt yoki obyektidan chiqayotgan issiqlik nurlanishini (infragizil nurlanishni) o'lchash orqali aniqlaydi. Bunga **infragizil termometrlar** (nuqta pirometrlari), **optik pirometrlar** va **termal tasvirlash kameralar** kiradi.

Infragizil (IR) termometrlar / pirometrlar

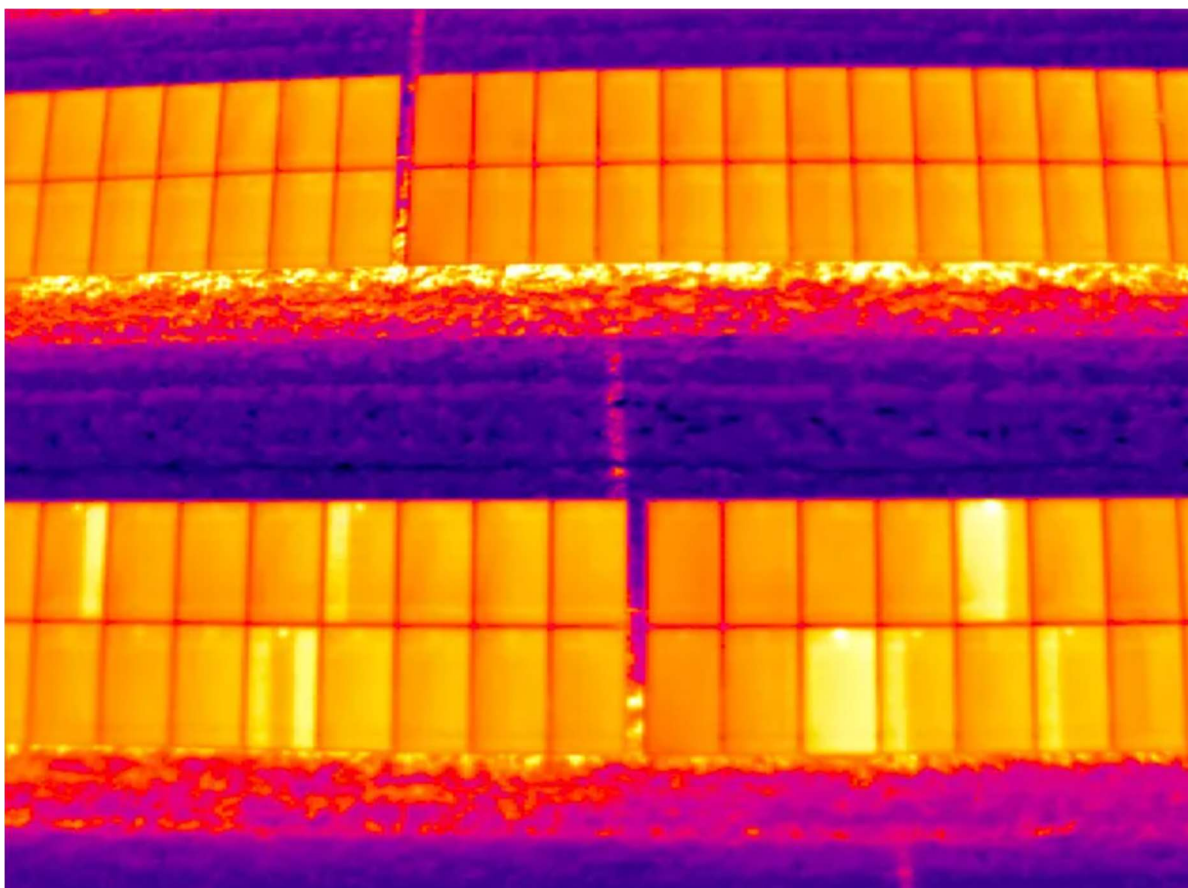
Oddiy IR termometr qo'lda ushlab ishlatiladigan yoki stasionar qurilma bo'lib, unda linza va IR to'lqin uzunliklariga sezgir detektor mavjud bo'ladi (odatda umumiy qo'llanish uchun 8-14 μm diapazoni). U nishonning kichik nuqtasidan kelayotgan nurlanish energiyasini o'lchaydi va nishon sirtining ma'lum **emissivligi** faraz qilingan holda uni harorat ko'rsatishiga aylantiradi. Pirometrlar tarixan juda yuqori haroratlarda uchun ishlatilgan, masalan, **optik pirometr** issiq obyekt yorqinligini kalibrlangan tolali ip (filament) yorqinligi bilan solishtirib, pechlardagi haroratlarni

($>700\text{ }^{\circ}\text{C}$) kontaktsiz o'lchaydi. Zamonaviy IR termometrlar odatda $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha (ba'zi maxsus turlari $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha) ishlatiladi va ishlayotgan mexanizmlar yuzasi, pech ichki qismi yoki quyosh issiqlik qabul qilgichlari (receiver) kabi sirtlarni ularga tegmasdan o'lchaydi. Ular deyarli darhol ko'rsatma beradi va harakatlanayotgan yoki elektr kuchlanishi ostidagi obyektlarga yo'naltirib o'lchash mumkin. **Emissivlik** juda muhim parametr hisoblanadi: agar sirt yaltiroq yoki qaytaruvchi bo'lsa (emissivligi past bo'lsa), IR termometr sozlanmasa noto'g'ri ko'rsatishi mumkin. Masalan, quyosh ostidagi jilolangan alyuminiy plastina emissivlik hisobga olinmasa aslidan sovuqroq ko'rinishi mumkin. Amaliyotda mutaxassislar ko'pincha qurilmada emissivlik qiymatini o'rnatadi (masalan, ko'pchilik organik yoki bo'yalgan sirtlar uchun $\varepsilon=0.95$) yoki aniq o'lchash uchun nishon nuqtasiga yuqori emissivlikli qoplama yoki lenta yopishtiradi. Quyosh energetikasi kontekstida IR nuqtali termometrlar panel yoki quvur haroratlarini tez tekshirishi mumkin, lekin bir vaqtning o'zida faqat bitta nuqtani o'lchash bilan cheklanadi.

Termal tasvirlash kameralar

Bular IR detektorlar matritsasiga (mikrobolometrlar) ega bo'lgan qurilmalar bo'lib, sahnaning 2D harorat xaritasini (termogramma) hosil qiladi. Termal kamera maydon bo'ylab minglab o'lchash nuqtalarini bir kadrda qayd etishi mumkin va natija turli haroratlar ranglar bilan kodlangan soxta rangli tasvir ko'rinishida ko'rsatiladi. Bu **haroratning bir tekis bo'lmagan joylarini** aniqlash uchun juda foydalidir. Quyosh PV tizimlarida termal tasvirlash PV panellardagi "hotspot"larni topish uchun standart usul hisoblanadi, nosoz elementlar yoki ulanishlar qizib ketadi va IR tasvirda yorqin (issiq) nuqtalar sifatida ko'rinadi, bu muammo borligini ko'rsatadi. Texnik xizmat jamoalari qo'lda ushlab ishlatiladigan yoki dronga o'rnatilgan IR kameralar bilan katta quyosh massivlarini skanerlashadi; hotspot atrofdagi elementlardan atigi bir necha $^{\circ}\text{C}$ issiqroq bo'lishi mumkin, lekin bu farq termal tasvirda oson ko'rinadi va operatorlarni nosoz modul yoki soyalash muammosidan ogohlantiradi. Quydagi rasm PV modulining konseptual termal tasviri bo'lib, unda bitta element issiqroq ko'rinadi va bu ehtimoliy issiq nuqtali (hotspot) nosozligini bildiradi. **CSP (Concentrating Solar Power)** stansiyalarida termal kameralar qabul qilgich quvurlari yoki markaziy qabul qilgich panellari sirtidagi harorat taqsimotini kuzatadi. Masalan, parabolik nov stansiyalarida NREL ning Thermal Scout kabi IR kamera tizimi minglab absorber quvurlarini ko'zdan kechirib, samaradorligi pasaygan yoki issiqlik yo'qotayotgan (leak) quvurlarni aniqlashi mumkin. Termal tasvirlash operatorlarga qizishning bir tekisligini ta'minlashga yordam beradi, sezilarli sovuq yoki issiq dog'lar aniqlansa, ularni bartaraf etish mumkin (masalan, oynalarni qayta yo'naltirish yoki shikastlangan

qabul qilgichni almashtirish). Bunday tizimlar ko'pincha dasturiy ta'minot va hatto dronlar bilan integratsiyalashadi, bu katta masshtabdagi skanerlashni avtomatlashtirishga yordam beradi. Termal kameralar **bino energetik auditi** uchun ham qo'llaniladi (issiqlik izolyatsiyasidagi yo'qotishlar yoki quyosh suv isitkich quvurlaridagi nosozliklarni aniqlash), bu termografiyaning energetika tizimlarida keng foydaliligini ko'rsatadi.



Rasm 18: Quyosh panelining Termal tasviri

Qo'llanilish va e'tibor beriladigan jihatlar

Kontaktsiz datchiklar **harakatlanayotgan yoki yetib borish qiyin** bo'lgan obyektlarni o'lchashda juda yaxshi. Masalan, aylanayotgan pech (kiln) harorati, baland minoralaridagi quyosh absorber quvurlari yoki PV invertordagi yuqori kuchlanishli elektr komponentlari tizimni to'xtatmasdan o'lchanishi mumkin. Ular **tez javob beradi** (IR detektorlar uchun deyarli real vaqt rejimida) va obyektga ta'sir ko'rsatmaydi (zond orqali issiqlik chiqib ketmaydi). Biroq ular **sirt haroratini** (nurlanish bo'yicha haroratni) o'lchaydi, va bu ichki haroratdan farq qilishi mumkin. Masalan, suyuqlik oqayotgan quvurga yo'naltirilgan IR termometr quvur tashqi sirt

haroratini beradi, quvur materiali juda yuqori issiqlik o'tkazuvchan bo'lmaguncha yoki tuzatish kiritilmaguncha, suyuqlik ichidagi haroratni bermaydi. Emissivlik va atrof-muhit omillari (chang, namlik, fon aks ettirishlari) xatolik kiritishi mumkin. Quyosh maydonlarida keng uchraydigan muammo quyosh aksini hisobga olishdir: termal kamera ma'lum burchaklarda yaltiroq PV paneldan qaytgan osmon yoki quyosh aksini “ko'rib” qolishi mumkin. Buni kamaytirish uchun tekshiruvlar odatda bir xil sharoitlarda bajariladi (masalan, PV ning old tomoni bo'yicha tush payti, quyosh aksi minimal bo'lganda, yoki kamerada filtrlar va quyoshdan himoya qiluvchi soyabonlardan foydalanish).

Yuqori haroratlarda uchun pirometrlar

Juda yuqori haroratlarga yetadigan quyosh konsentratorlarida (quyosh pechlari yoki 1000+ °C gacha bo'lgan tadqiqot qurilmalari kabi) maxsus nisbatli (ratio) pirometrlar yoki ko'p to'lqin uzunlikli IR datchiklar qo'llaniladi. Ular ikki xil to'lqin uzunligi diapazonida nurlanishni o'lchaydi va ikki signal nisbatidan foydalanib, emissivlik noma'lum bo'lsa ham, uni kompensatsiya qilgan holda haroratni hisoblaydi. Bunday qurilmalar quyosh qabul qilgich quvurlarining (taxminan ~600 °C bo'lishi mumkin) yoki issiqlik energiyasini saqlash yuzalarining haroratini kontaktsiz nazorat qilish uchun ishlatiladi, va bu material chegaralaridan ortiq qizib ketmasligini ta'minlaydi. Ayrim CSP obyektlarida ish jarayonida qabul qilgich haroratini uzluksiz kuzatish uchun qabul qilgich tomonga yo'naltirilgan doimiy pirometrik datchiklar o'rnatiladi.

Xulosa qilib aytganda, quyosh muhandisligida kontaktsiz harorat o'lchash kontakt datchiklarini muhim tarzda to'ldiradi. Ayniqsa IR termografiya muhim diagnostika vositasiga aylandi: **PV ekspluatatsiyasida termal tasvirlar nosoz modullarni tez ko'rsatadi**, CSP da esa qabul qilgich bo'ylab **issiqlik yutilishi samarali ekanini** tekshiradi. Bu qurilmalardan foydalanishda muhandislar sirt emissivligi va atrof-muhit ta'sirlarini hisobga olishi kerak. Aniqlikni ta'minlash uchun ko'pincha kalibrlash manbalari (masalan, blackbody etalon) joyida IR kameralarni kalibrlashda qo'llaniladi. Qisqacha aytganda, IR termometrlar va kameralar haroratni **masofadan turib kuzatish** imkonini beradi, bu xavfsizlikni oshiradi va kontakt zondlar bilan jihozlash amaliy bo'lmagan katta quyosh maydonlarini qamrab olishga yordam beradi..

3.3 Haroratni kalibrlash va xatolik manbalari

Aniq harorat o'lchovlari datchiklarni kalibrlashni va xatolik manbalarini tushunishni talab qiladi. Kalibrlash datchik ko'rsatishi standartlarga (masalan, ITS-

90 xalqaro harorat shkalasi) muvofiq haqiqiy harorat qiymatlariga mos kelishini ta'minlaydi. Keng tarqalgan kalibrlash usullari va xatoliklarga oid asosiy mulohazalar quyidagilarni o'z ichiga oladi:

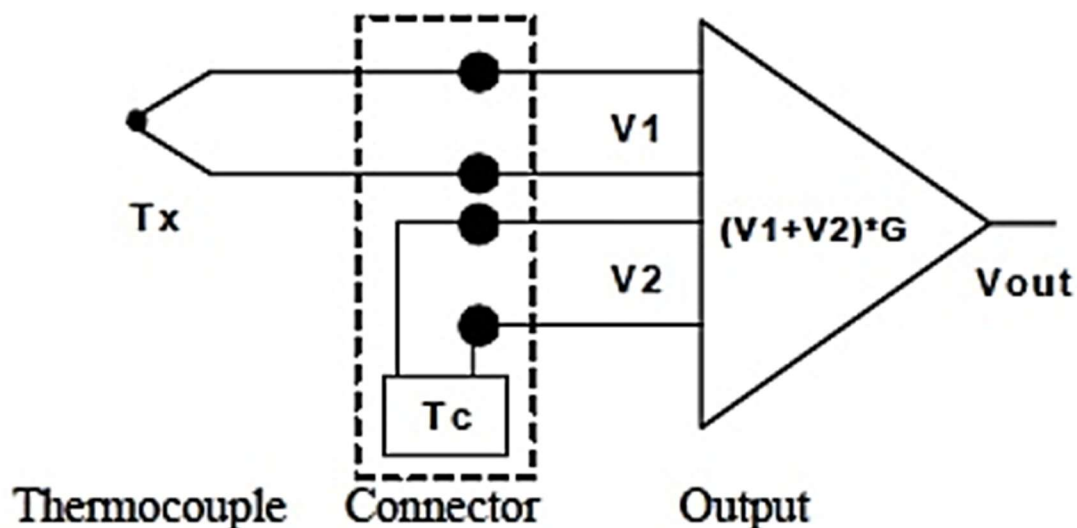
Fiksatsiyalangan nuqta bo'yicha kalibrlash (muzlash nuqtasi, qaynash nuqtasi)

Eng sodda kalibrlash etalonlaridan biri **muzlash nuqtasidir** ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Datchikni toza muz va suvning yaxshi aralashtirilgan aralashmasiga botirish orqali $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ etalon hosil qilinadi; termopara yoki RTD shu sharoitda $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ko'rsatadigan qilib sozlanishi mumkin. Xuddi shuningdek, standart bosimda **suvning qaynash nuqtasi** $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ etalon beradi (biroq barometrik bosim o'zgarishlari kichik farqlar keltirib chiqaradi, shuning uchun yuqori izchillik talab qilinadigan laboratoriyalarda **suvning uch nuqtasi yacheykasi** ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$) yoki boshqariladigan bosim ostidagi **bug'lash nuqtasi** kabi yanada nazorat qilinadigan etalon ishlatiladi). Maydondagi tezkor tekshiruvlar uchun muz vannasi termometrlarni $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da kalibrlashda qulay usul hisoblanadi. **Quruq blokli kalibratorlar** (dry block calibrators) ko'chma qurilmalar bo'lib, ular ma'lum diapazonda barqaror harorat hosil qila oladi (modeliga qarab, masalan, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha). Siz zondni metall blokda teshikka kiritasiz va uning ko'rsatishini blokning o'rnatilgan harorati bilan solishtirasiz (blok harorati ichki etalon termometr tomonidan nazorat qilinadi). Bu suyuqliklar bilan ishlashdagi noqulayliklarsiz turli nuqtalarda (masalan, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, ... jarayonning ish haroratigacha) maydon datchiklarini kalibrlash imkonini beradi. Yana bir usul - boshqariladigan harorat vannasi yoki kamerada sinov qilinayotgan datchik bilan yonma-yon yuqori aniqlikdagi **etalon termometrni** ishlatishdir. Etalon termometr (o'zi ham milliy standartlarga metrologik izchil kalibrlangan bo'ladi) haqiqiy haroratni beradi, sinovdagi datchikning chiqishi esa shu qiymatga nisbatan sozlanadi yoki tavsiflanadi.

Termoparaga xos jihatlar (sovuq birikma kompensatsiyasi)

Termoparalar absolyut haroratni emas, **harorat farqini** o'lchaydi. Ular hosil qiladigan kuchlanish issiq birikma (o'lchash uchi) va sovuq birikma (simlar o'lchash asbobiga ulanadigan joy) orasidagi farqqa proporsional bo'ladi. Shuning uchun klassik kalibrlash nuqtalaridan biri muz nuqtasidir: tarixan termoparaning etalon birikmasi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da (muz vannasida) ushlab turilgan, natijada chiqish kuchlanishi bevosita $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan yuqoridagi o'lchanayotgan haroratga mos kelgan. Zamonaviy asboblarda elektron **sovuq birikma kompensatsiyasidan (CJC)** foydalanadi, bunda termistor yoki RTD klemmlar haroratini o'lchaydi va xuddi o'sha birikma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da bo'lgandek ekvivalent kuchlanishni qo'shadi. Termoparalarni kalibrlashda CJC

aniqligini ta'minlash kerak; masalan, termopara 100 °C moy vannasida 100.0 °C ko'rsatsa, xona haroratidagi sovuq birikma kompensatsiyasi to'g'ri bo'lishi shart, aks holda og'ish (bias) paydo bo'ladi. Termoparalarni kalibrlash ko'pincha ma'lum haroratlarni (0 °C, 100 °C va h.k.) o'lchash va *xatolik egri chizig'ini* tuzishni yoki aniqlikni oshirish uchun standart polinom tuzatishlarni qo'llashni o'z ichiga oladi.



Rasm 19: Sovuq Birikish Kompensatsiya konsepti

RTD va termistorlarni kalibrlash

Bu datchiklar odatda ularni standart termometr bilan birga barqaror harorat muhitiga joylashtirish orqali kalibrlanadi. RTDlar uchun kalibrlash muz nuqtasida qarshilikni (R_0 , 0 °C dagi qiymat) va yana bir nuqtada (masalan, bug' nuqtasida) qarshilikni o'lchashni o'z ichiga olishi mumkin, shunda qiyalik (kalibrlash doimiysi α) aniqlanadi. Yuqori aniqlikdagi laboratoriya kalibrlashlarida fiksatsiyalangan nuqta yacheykalari (masalan, toza ruxning qotish nuqtasi ~419.527 °C, qalayning 231.928 °C dagi nuqtasi va h.k.) ishlatilib, SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometers) kalibrlanadi, ular esa o'z navbatida maydon RTDlarini kalibrlashda etalon bo'lib xizmat qiladi. Agar yuqori absolyut aniqlik kerak bo'lsa, termistorlar ko'pincha alohida (individual) kalibrlashni talab qiladi: ko'p nuqtali kalibrlash (masalan, 0 °C, 25 °C, 50 °C da) bajarilib, termistorning qarshilik-harorat egri chizig'i uchun Steinhart-Hart tenglamasi moslashtiriladi..

Xatolik manbalari va ularni kamaytirish

Harorat o'lchashdagi asosiy xatolik manbalariga **datchik drift**, **nochiziqlilik**, **o'z-o'zidan qizish** va **atrof-muhit ta'sirlari** kiradi:

- *Drift:* Vaqt o'tishi va ishlatish jarayonida datchiklar dastlabki kalibrlashdan og'ishi mumkin. **Termoparalar** yuqori haroratlarda simlarning oksidlanishi yoki metallurgik o'zgarishlar tufayli sezilarli drift qilishi mumkin, masalan, havoda $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ da ishlatilgan K turidagi termoparalarda vaqt o'tishi bilan notekisliklar paydo bo'lib, chiqish bir necha darajaga o'zgarishi mumkin. Bunday holatlarda muntazam kalibrlash tekshiruvlari yoki almashtirish zarur bo'ladi. **RTDlar** mexanik zarba ta'sirida yoki ruxsat etilgan haroratdan oshib ketgan holatlarda drift qilishi mumkin (platinali RTDlar ancha barqaror, biroq yuqori haroratda izolyatsiya qarshiligi yomonlashuvi xatolik kiritishi mumkin). **Termistorlar** haddan tashqari qizish yoki termik sikllanishga duch kelsa drift qilishi mumkin, biroq ko'p qo'llanmalarda material chegaralariga yaqin ishlatilmasa, ularning barqarorligi yetarli bo'ladi.



Rasm 20: Datchikni Kalibrlash and O'lchov tizimi

- *Nochiziqlilik va chiziqlilashtirish:* Qayd etilgandek, termopara chiqishi nochiziqli; keng diapazonda chiziqli deb faraz qilishdan keladigan xatolik bir necha daraja bo'lishi mumkin. Zamonaviy asboblari yoki mikrokontroller asosidagi tizimlar ko'pincha polinom chiziqlilashtirishni qo'llaydi yoki qidiruv jadvallaridan (NIST standart koeffitsientlari bo'yicha) foydalanib, xom kuchlanishni haroratga aylantiradi. RTDlarda Callendar-Van Dusen tenglamasi bilan tavsiflanadigan kichik nochiziqlilik mavjud; ko'plab tizimlar cheklangan diapazonlarda ularni chiziqli deb qabul qiladi yoki kengroq diapazon uchun kvadratik tuzatish kiritadi. Termistorlar juda nochiziqli ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ dagi sezgirliги haroratga qarab o'zgaradi), shuning uchun analog o'qishlarda ulardan foydalanganda chiziqlilashtirish juda muhim. Odatda tor diapazonni chiziqlilashtirish uchun ketma-ket yoki parallel rezistor qo'llaniladi, yoki

mikroprotsessor qarshilikdan haroratni hisoblash uchun Steinhart-Hart tenglamasidan foydalanadi. To'g'ri chiziqlilashtirish nafaqat aniqlikni oshiradi, balki kalibrlashni ham soddalashtiradi (kalibrlashni chiziqlilashtirilgan sohada bajarish mumkin, masalan, chiziqlilashtirilgan transmitter chiqishini $^{\circ}\text{C}$ da kalibrlash).

- *O'z-o'zidan qizish:* RTD yoki termistor qarshiligini o'lchash uchun ulardan tok o'tkazilganda, elektr quvvat datchikning o'zini atrof-muhitdan yuqoriroq haroratgacha qizdirishi mumkin. Bu musbat xatolik keltirib chiqaradi (datchik haqiqiy atrof-havo haroratidan yuqori ko'rsatadi). RTDlar odatda kichik qo'zg'atish toklaridan (1 mA yoki undan kam) foydalanadi, shunda o'z-o'zidan qizish, masalan, 0.1°C dan past bo'ladi (muhitga bog'liq: havoda RTD o'z-o'zidan qizishi yaxshi aralashtirilgan suyuqlikka qaraganda ko'proq bo'lishi mumkin). Termistorlarda qarshilik yuqoriroq bo'lgani uchun tok yanada kichik bo'ladi, lekin sezgirlik juda katta bo'lgani sababli o'z-o'zidan qizish baribir muammo bo'lishi mumkin. Yaxshi amaliyot - kalibrlashni amalda ishlatiladigan o'lchash toki bilan bajarish yoki o'z-o'zidan qizish uchun aniq tuzatish kiritishdir. Ba'zi sxemalar duty cycle ni kamaytirish va o'qishlar orasida datchik sovishi uchun impulsli yoki davriy qo'zg'atishni qo'llaydi.
- *Ulovchi simlar va sxema xatoliklari:* RTDlarda ulovchi simlarning qarshiligi xatolik kiritishi mumkin. **2-simli RTDda** datchik va simlar ketma-ket ulangan bo'ladi, shuning uchun sim qarshiligi o'lchangan qiymatga bevosita qo'shiladi (uzun kabellarda bu sezilarli bo'lishi mumkin). Shu sababli **3-simli va 4-simli RTD ulanishlari** ishlatiladi: ular RTD elementidagi kuchlanish tushuvini kompensatsiya qilish yoki bevosita o'lchashga imkon beradi va sim ta'sirini bartaraf etadi. Kalibrlash paytida, ayniqsa 3- yoki 4-simli RTDlar uchun, kalibrlash qurilmasi RTDni aynan shu ulanish konfiguratsiyasida o'lchashini ta'minlash yoki shuni mos ravishda imitatsiya qilish kerak bo'ladi. Termoparalarda ulovchi simlar to'g'ri turdagi bo'lishi yoki kompensatsion kabel bo'lishi kerak; termoparada mis (copper) uzaytirgich sim ishlatilsa, yangi birikma paydo bo'ladi va u bir xil haroratda bo'lmasa xatolik keltirib chiqarishi mumkin.
- *Atrof-muhit ta'sirlari:* Atrof-havo haroratining o'zgarishi o'lchash asbob-uskunalariga ta'sir qilishi mumkin. Masalan, termopara o'qish qurilmasidagi sovuq birikma kompensatsiyasi atrof haroratini aniq kuzatib borishi kerak; agar elektronika quyoshda qizib ketsa, termopara ko'rsatishi siljishi mumkin. Ba'zi yuqori aniqlikdagi termopara etalon birikma bloklari issiqlik jihatdan izolyatsiya qilinadi yoki hatto ma'lum doimiy haroratda aktiv boshqariladi, shunda bu xatolik yo'q qilinadi. Elektr shovqin ham muhim omil: termoparaning mikrovolt

darajasidagi signallari EM xalaqitga sezgir. Buning uchun burama juft (twisted), ekranlangan (shielded) termopara uzaytirgich simlari va filtrlashga ega past shovqinli kuchaytirgichlardan foydalanish zarur. Integratsiya vaqti (yoki filtrlash) AC shovqinni o'rtachalashi mumkin (ko'plab harorat tizimlarida 50/60 Hz notch filtrlash ishlatiladi). Kuchli EMI muhitida (masalan, PV stansiyasidagi invertorlar yaqinida) termopara yoki RTD yoniga **4-20 mA transmitter** ulash shovqin muammosini ancha kamaytirishi mumkin (transmitter haroratni ifodalovchi barqaror tok signalini chiqaradi).

Kalibrlash davriyligi va metrologik kuzatuvchanlik

Kritik o'lchovlarda ishlatiladigan harorat datchiklari (masalan, ishlash kafolati sinovlari yoki xavfsizlik monitoringi uchun) jadval asosida kalibrlanishi kerak. Odatdagi jadval RTD va termistorlar uchun yiliga bir marta bo'lishi mumkin, va yuqori haroratlarda ishlatiladigan termoparalar uchun drift tufayli bundan ham tez-tez bo'lishi mumkin. Kalibrlash milliy standartlarga **metrologik izchil** bo'lishi kerak (masalan, AQShda NIST yoki Buyuk Britaniyada NPL). Bu degani, ishlatilgan etalon asboblari yoki fiksatsiyalangan nuqta yacheykalari xalqaro standartlar bilan bog'langan ma'lum aniqlikka ega bo'ladi. Akademik kontekstda talabalar **muzlash nuqtasi bo'yicha kalibrlash** laboratoriya ishini bajarib, kalibrlash egri chizig'ini tuzishni o'rganishi mumkin. Sanoatda esa asboblari akkreditatsiyalangan laboratoriyaga kalibrlash uchun yuborilishi yoki korxona ichidagi kalibrlash vannalari va etalon termometrlardan foydalanilishi mumkin, va bu etalonlar o'z navbatida davriy kalibrlanib turadi (kalibrlash laboratoriyalari uchun ISO/IEC 17025 standartlari talab qilganidek).

Xulosa qilib aytganda, ehtiyotkor kalibrlash (imkon bo'lsa o'lchash diapazonini qamrab oladigan bir nechta nuqtalarda) va xatolik manbalarini tushunish harorat o'lchashda aniqlikni ta'minlash uchun muhim. Quyosh stansiyalaridagi sharoitlar, masalan, atrof-havo haroratining katta tebranishlari, invertorlar yoki trekerlardan keladigan elektromagnit shovqin, va kuchli quyosh nuri mavjudligi, bularning barchasi datchiklarni mustahkam o'rnatish va tez-tez verifikatsiyani talab qiladi. To'g'ri usullar (masalan, termoparalar uchun CJC, RTDlar uchun 4-simli o'lchash, va etalon datchiklar bilan maydondagi tekshiruvlar) yordamida muhandislar quyosh energetika tizimlarini monitoring qilish va boshqarish uchun ishonchli harorat ma'lumotlariga erishishi mumkin.

Savol-Javob: Haroratni o'lchash:

1. *Nega 100 °C atrofidagi quyosh suv isitish bakining haroratini o'lchashda termoparaga nisbatan RTD tanlanishi mumkin?*

Javob: Chunki RTDlar 0-200 °C diapazonda yuqori aniqlik va barqarorlikni ta'minlaydi va chiqish signali deyarli chiziqli bo'ladi, bu esa suv haroratini aniq monitoring qilishga imkon beradi. Bak harorati o'rtacha (RTD diapazoni ichida bema'lol), shuning uchun RTDning yuqori aniqligi ($\pm 0.1-0.5$ °C) termoparaning ± 2 °C noaniqligiga nisbatan afzal hisoblanadi. Bundan tashqari, 100 °C da termoparaning yuqori diapazon bo'yicha afzalligi kerak emas, va RTDning sezgirliги yaxshiroq bo'lishi hamda sovuq birikma kompensatsiyasiga ehtiyoj bo'lmasligi o'lchovni sodda qiladi.

2. *K turidagi termopara va Pt100 RTD kalibrlash vannasida ikkalasi ham 250 °C ko'rsatmoqda. Bir yil maydonda ishlatilgandan keyin termopara xuddi shu vannada 252 °C ko'rsatdi, RTD esa 250.2 °C ko'rsatdi. Nega termoparada drift kattaroq bo'lishi ehtimoliy?*

Javob: Termoparalarda yuqori haroratlarda metallurgik o'zgarishlar (oksidlanish, ifloslanish) sababli drift yuzaga kelishi odatiy. K turi bir yil davomida qotishma degradatsiyasi yoki notekislik (inhomogeneity)ga uchragan bo'lishi mumkin, bu esa chiqish signalining kichik siljishiga olib kelgan (2 °C ga yuqoriroq ko'rsatish). RTDlar (ayniqsa platinali) o'rtacha haroratlarda vaqt bo'yicha barqarorroq bo'ladi, shuning uchun uning ko'rsatishi deyarli o'zgarmagan. Bu termopara driftini xatolik manbasi sifatida ko'rsatadi. Aniqlikni saqlash uchun termoparani muntazam qayta kalibrlash yoki almashtirish kerak bo'ladi.

3. *“Sovuq birikma kompensatsiyasi” nima va u termopara o'lchovlarida nima uchun kerak?*

Javob: Sovuq birikma kompensatsiyasi (CJC) termoparaning etalon birikmasi haroratini hisobga olish uchun qo'llaniladigan usuldir (termopara simlari mis klemmlarga, ya'ni asbob terminallariga ulangan nuqta). Termoparalar harorat farqini o'lchaydi, ya'ni chiqish kuchlanishi issiq (o'lchanayotgan) birikma va sovuq birikma orasidagi farqqa mos keladi. Standart termopara jadvallari sovuq birikma 0 °C da deb faraz qiladi. Amaliyotda sovuq birikma atrof-muhit haroratida (masalan, 25 °C) bo'lishi mumkin; CJC shu birikma haroratini (datchik yordamida) o'lchaydi va 0 °C dan shu haroratgacha hosil bo'ladigan ekvivalent termopara kuchlanishini qo'shib tuzatish kiritadi. Bu termopara ko'rsatishi issiq birikmadagi haqiqiy absolyut haroratni aks ettirishini ta'minlaydi. CJC bo'lmasa, atrof-muhit harorati o'zgarganda termopara sovuq

birikma 0 °C da ushlab turilmagani uchun ko'rsatishi pastroq yoki yuqoriroq chiqib ketadi.

4. Bosimni o'lchash asboblari

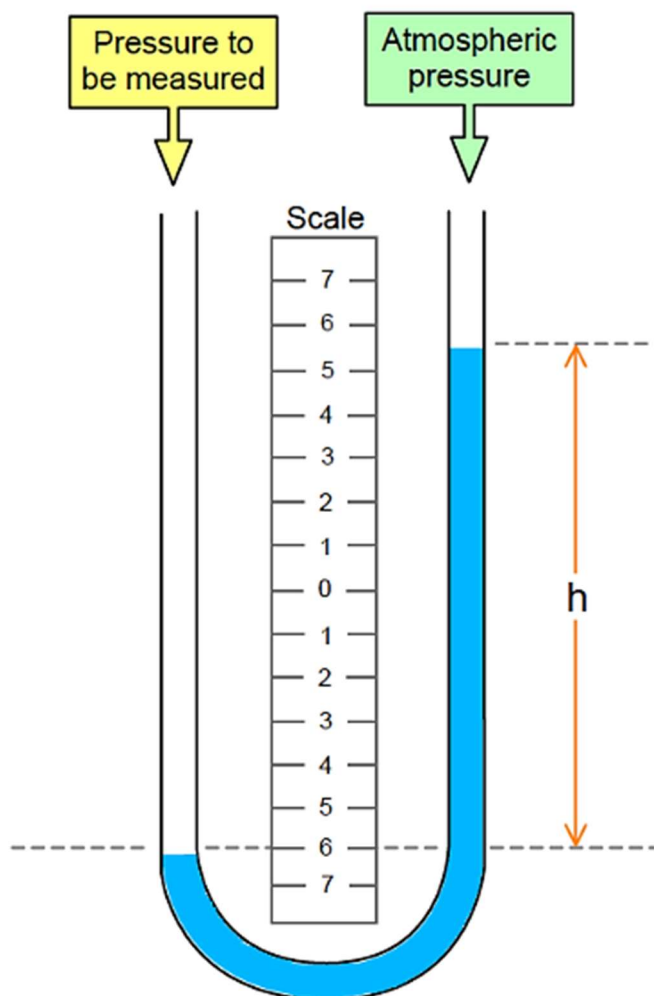
4.1 Manometrlar, pyezoelektrik datchiklar va tenzodatchikli bosim datchiklari

Mexanik va elektron bosimni sezish

Bosimni elementning mexanik deformatsiyasi orqali yoki bosimni o'zgartirgichlar (transduserlar) yordamida elektr signaliga aylantirish orqali o'lchash mumkin. An'anaviy **manometrlar** bosim farqlarini suyuqlik ustuni yordamida o'lchaydi, zamonaviy **elektron datchiklar** esa bosim ta'siridagi kuchlanish (stress) ostida elektr chiqish hosil qiladigan materiallardan, masalan tenzodatchiklar yoki pyezoelektrik kristallardan foydalanadi.

Manometr aslida suyuqlik bilan (ko'pincha suv, moy yoki simob) to'ldirilgan U-shaklli trubka bo'lib, u bosimni suyuqlik ustuni balandligi bilan muvozanatlaydi. U-trubkaning bir uchi bosim manbaiga, ikkinchi uchi esa etalon bosimga (ko'pincha atmosfera yoki boshqa bosim) ulanadi. Suyuqlik ustunlari balandligidagi farq gidrostatik qonun bo'yicha bosim farqiga bevosita bog'liq: $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$. Masalan, balandligi 10 sm bo'lgan suv ustuni taxminan 0.98 kPa bosim farqini bildiradi. Manometrlar **sodda** va pastdan o'rtacha bosimlargacha **juda aniq** hisoblanadi. Ular kalibrlashda birlamchi etalon sifatida xizmat qiladi (laboratoriyadagi simob manometrlari bosimni $\sim 0.1\%$ yoki undan ham kichik noaniqlik bilan o'lchashi mumkin, chunki hisoblash faqat yaxshi ma'lum zichlik va gravitatsiya konstantalariga bog'liq). Quyosh energetikasi qo'llanmalarida manometrlar maydon sharoitidan ko'ra ko'proq **laboratoriyada** yoki o'zgartirgichlarni kalibrlashda ishlatilishi mumkin, chunki ular katta tizimlar uchun ko'chma emas va amaliy muammolarni keltirib chiqaradi (masalan, simob xavfli, va past bosimlarda eng kichik bo'linma qiymatini yaxshilash uchun trubkani qiyalatish talab qilinadi). Shunga qaramay, manometrdan kichik differensial bosimlarni o'lchashda foydalanish mumkin, masalan, quyosh HVAC tizimidagi havo filtridagi bosim tushuvini o'lchash yoki quyosh issiqlik konturidagi kengaytirish bakidagi past bosimli datchik kalibrlashini qo'l bilan tekshirish. Uning **kuchli tomonlari**: quvvat manbai talab qilinmaydi, tabiatan chiziqli va elektr xalaqitlariga sezgir emas. **Kamchiliklari**: kattaroq o'lchamli bo'ladi, baland ustunlar yoki yuqori zichlikli suyuqlik ishlatilmasa nisbatan past bosimlar bilan cheklanadi, va masofadan o'qish yoki tez o'zgarishlarni (transient) kuzatish uchun qulay emas. Yuqori haroratli quyosh stansiyasi sharoitida manometrlar uzluksiz monitoring uchun amaliy bo'lmaydi, biroq ular **maydon kalibrlash to'plamlarida** uchrashi mumkin

(masalan, bosim transmitterining ko'rsatishini bir-ikki nuqtada tekshirish uchun suv yoki moy manometri ishlatiladi).



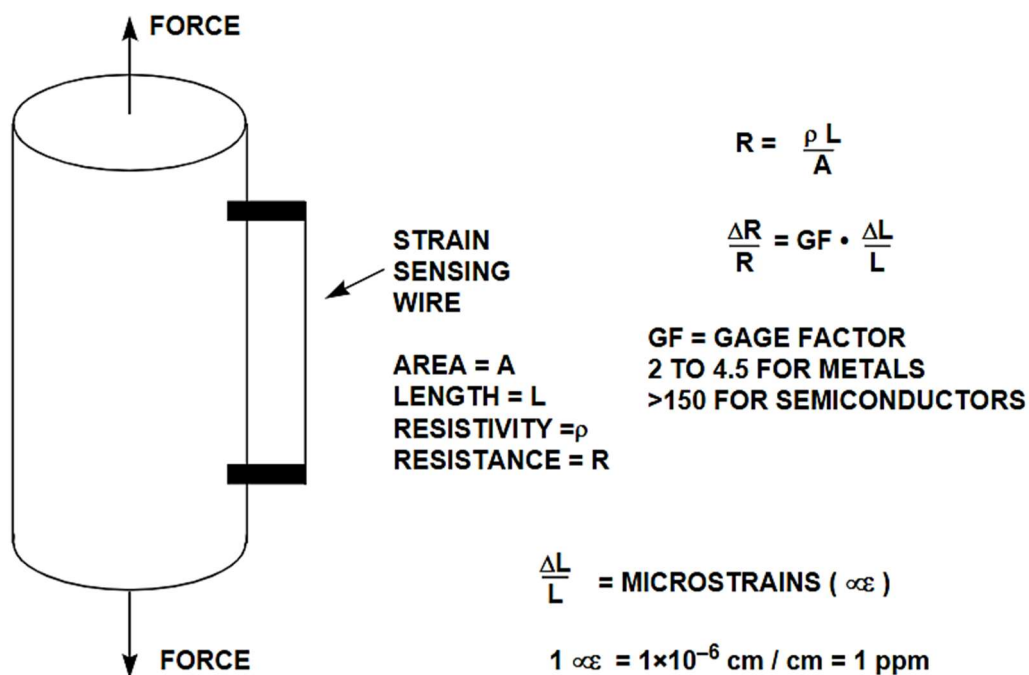
Rasm 21: Manometer

Elastik deformatsiya asosidagi o'lchagichlar (Bourdon, bellows va boshqalar)

To'liq elektron datchiklar keng tarqalmaguncha, ko'plab sanoat bosim o'lchagichlari bosim ta'sirida deformatsiyalanadigan mexanik elementlardan foydalangan. Masalan, **Bourdon trubkalari** (ichki bosim oshganda tekislanishga intiladigan egri metall trubka), **bellovlar** (gofrali silindrsimon elementlar) va **diafragmalar** keng qo'llanilgan. Bu qurilmalar bosimni og'ish yoki harakatga aylantiradi va bu harakat strelkani yuritishi yoki o'zgartirgich tomonidan sezilishi mumkin. Sarlavhada alohida berilmagan bo'lsa ham, Bourdon o'lchagichlar hanuz keng tarqalganini qayd etish kerak (masalan, quvurlar va baklarda ko'rinadigan dumaloq shkalali bosim o'lchagichlar). Ular to'liq mexanik, mustahkam va quvvat talab qilmaydi, shu sababli quyosh issiqlik stansiyalarida elektron datchiklarga lokal ko'rsatkich yoki zaxira sifatida foydali bo'lishi mumkin (masalan, nasos bosimini

ko'rsatish uchun issiqlik uzatuvchi suyuqlik liniyasidagi Bourdon o'lchagich). Biroq ular odatda faqat o'sha joyning o'zida ko'rsatadi va vibratsiya yoki harorat ta'siridan xatolik yuzaga kelishi mumkin (aniqlik odatda to'liq shkalaning $\pm 1-2\%$ i bo'lishi mumkin).

UNBONDED WIRE STRAIN GAGE



Rasm 22: Bog'lanmagan simli kuchlanish o'lchagich

Tenzodatchikli bosim datchiklari

Bular **elektron datchiklar** bo'lib, unda mexanik sezuvchi element (masalan, diafragma) bosimni deformatsiyaga (strain) aylantiradi, so'ng bu deformatsiya tenzodatchiklar orqali elektr signaliga aylantiriladi. Odatda yupqa diafragma (po'lat, kremniy yoki keramika) bosim ta'sirida juda oz miqdorda egiladi. Tenzodatchiklar (kichik rezistiv folgalar yoki yarimo'tkazgich elementlar) diafragma yopishtiriladi, diafragma cho'zilganda yoki siqilganda ularning qarshiligi o'zgaradi. Ular "Wheatstone" **ko'prigi sxemasida** joylashtiriladi, shunda kichik qarshilik o'zgarishlari bosimga proporsional bo'lgan o'lchanadigan kuchlanish chiqishini hosil qiladi. Tenzodatchikli o'zgartirgichlar sanoatda juda keng tarqalgan bo'lib, vakuumdan juda yuqori bosimlargacha (MPa darajasi yoki yuzlab bar) diapazonni qamrab oladi. Quyosh stansiyasida, masalan, quyosh maydoni quvurlaridagi **HTF (Heat Transfer Fluid)** bosimini nazorat qilish uchun tenzodatchikli bosim transmitteridan foydalanish mumkin (nasos va quvur spetsifikatsiyalari doirasida ekanini ta'minlash uchun) yoki CSP quvvat blokidagi **bug' bosimini** o'lchash

mumkin (turbina konturida taxminan 100 bar bo'lishi mumkin). Bu datchiklar quvvat va signalni qayta ishlashni talab qiladi, biroq masofadan elektron o'qish va boshqaruv tizimlariga (SCADA/PLC) integratsiya imkonini beradi. Ular uzluksiz ishlashga chidamli va yuqori harorat uchun mos materiallarda tayyorlanishi mumkin. Masalan, sovitish elementi bilan yoki masofaviy diafragma (remote diaphragm) orqali tenzodatchikli datchik nov stansiyasida 400 °C dagi moy bosimini o'lchashi mumkin. **Konstruktiv muvozanatlar:** diafragma qalinligi va materiali diapazon hamda sezgirlikka ta'sir qiladi, qalin diafragma yuqori bosimga chidamliroq, lekin sezgirliги pastroq bo'ladi (har bir bar uchun deformatsiya kichikroq), yupqa diafragma esa sezgirroq, lekin past bosimlargacha cheklanadi. **Chastota javobi** bo'yicha ham muvozanat bor: tenzodatchikli datchiklar statik va dinamik bosimlarni o'lchay oladi, biroq juda tez transientlar diafragma rezonansi yoki signalni qayta ishlash kanalining o'tkazish polosasi bilan cheklanishi mumkin (shunga qaramay, nasos pulsatsiyalari yoki klapan amallari kabi odatiy tebranishlarni bemalol ushlay oladi). Ular vaqt o'tishi bilan kichik driftga ega bo'lishi mumkin (ba'zida nolni qayta kalibrlash kerak bo'ladi) va harorat ta'siriga sezgir bo'lishi mumkin (shu sababli ko'pida tenzodatchik ko'prigida harorat kompensatsiyasi mavjud bo'ladi, u turli atrof-muhit yoki muhit haroratlari da aniqlikni saqlashga yordam beradi).

Pyezoelektrik bosim datchiklari

Pyezoelektrik materiallar (masalan, kvarts yoki ayrim keramikalar) kuchlanish (stress) ta'sirida elektr zaryad hosil qiladi. **Pyezoelektrik bosim datchiklari** bundan foydalanadi, ya'ni bosim kristallga kuch sifatida uzatiladi (ko'pincha diafragma yoki porshen orqali kuch kristallga o'tkaziladi). Hosil bo'lgan zaryad yoki kuchlanish bosim o'zgarishiga proporsional bo'ladi. Muhimi, pyezoelektrik datchiklar faqat **dinamik yoki transient bosimlarni** aniqlay oladi, statik DC bosimni aniqlay olmaydi, chunki zaryad vaqt o'tishi bilan so'nadi va bosim barqaror bo'lganda netto zaryad nolga qaytadi (maxsus yuqori impedansli sxemalarda zaryad qisqa vaqt ushlab turilmasa). Shu sababli pyezoelektrik datchiklar **tez o'zgaradigan bosimlar** uchun juda mos: masalan, oqimdag i bosim tebranishlari yoki impuls larni, akustik bosimni, dvigatel silindridagi bosimni va h.k. o'lchash. Quyosh sohasida pyezoelektrik datchiklar R&D yoki diagnostikada qo'llanilishi mumkin, masalan, nasos vibratsiyalari sababli suyuqlik liniyasidagi yuqori chastotali bosim tebranishlarini o'lchash yoki ikki fazali oqimni aniqlash uchun bug' oqimidagi tovush bosimini o'lchash. Ularning javobi juda tez (rezonans chastotasi kHz diapazonida), shuning uchun ular tenzodatchikli datchiklar o'tkazib yuborishi mumkin bo'lgan bosim piklarini ushlashi mumkin. Biroq ular barqaror bosimni

ishonchli o'lchay olmaydi (masalan, quyosh kollektor konturidagi doimiy 10 bar bosimni faqat pyezoelektrik datchik bilan o'lchab bo'lmaydi; chiqish asta-sekin nolga "suzib" ketadi). Ular yuqori impedansli kuchaytirgichlarni (ko'pincha charge amplifier) talab qiladi va kundalik sanoat boshqaruv konturlaridan ko'ra ko'proq laboratoriya yoki dvigatel monitoringi sohalarida uchraydi. Xulosa qilib aytganda, **pyezoelektrik datchiklardan dinamik o'lchovlar** (vibratsiya, pulsatsiya) uchun, **tenzodatchikli datchiklardan esa statik yoki sekin o'zgaradigan** bosimlar uchun foydalaniladi.

Yuqori harorat va suyuqlik konturlari bo'yicha qo'llanmalar

Quyosh stansiyalarida, ayniqsa CSP da, boshqaruv va xavfsizlik uchun bosimi o'lchanishi kerak bo'lgan **yuqori haroratli suyuqliklar** (moy, eritilgan tuz, bug') mavjud bo'ladi:

- **Eritilgan tuzli minorada** bosimlar odatda juda yuqori bo'lmaydi (tuz ko'pincha qabul qilgich panellari va saqlash baklarida atmosfera bosimiga yaqin bo'ladi), lekin $\sim 565^{\circ}\text{C}$ da ishonchli datchiklar kerak bo'ladi. Tenzodatchikli transmitterlar ko'pincha oraliq sovitish elementi bilan yoki kapillyar orqali masofadan o'rnatilgan holda qo'llaniladi (datchik elektronikasini sovuqroq ushlab turish uchun). Maxsus yuqori haroratli bosim o'zgartirgichlar keramika diafragma va elektronika qismini ajratuvchi yechimlar orqali $\sim 600^{\circ}\text{C}$ gacha o'lchashi mumkin.
- **Parabolik nov tizimlarida** sintetik moy maydonda $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ haroratda taxminan 10-20 bar bosimda aylanadi. 400°C xizmat sharoitiga mos baholangan, tegishli zanglamas po'lat diafragma ega standart sanoat bosim transmitterlari (tenzodatchikli tur) ishlatiladi. Masalan, har bir kontur chiqish bosimini kuzatib, kontur tiqilib qolganini yoki klapan nosozligini aniqlash mumkin.
- Quyosh elektr stansiyalaridagi **bug' konturlari** (masalan, CSP stansiyasida qozon va turbina klapan qismi) yuqori bosimlarda ishlaydi (konstruktsiyaga qarab, ehtimol 50-100 bar). Shu diapazonlarga mos tenzodatchikli bosim datchiklari bug' barabanlari, quvur kollektorlarida va h.k. joylarda o'rnatiladi, ko'pincha sifon trubkalar yoki sovitish elementlari orqali bug'ning bevosita issiqligidan himoyalangani. Bu datchiklar ma'lumotni stansiyaning DCS (distributed control system) tizimiga uzatadi va u boshqaruv hamda xavfsizlik blokirovkalari (interlocks) uchun ishlatiladi.
- **Manometrlar quyosh HVAC tizimlarida** uchrashi mumkin: masalan, havo ishlov berish qurilmasi filtrining ikki tomoniga ulangan manometr (yoki uning

zamonaviy ekvivalenti Magnehelic o'lchagichi) bosim tushuvini o'lchaydi (bu filtr ifloslanganini ko'rsatadi). Yoki quyosh issiqlik tizimini ishga tushirish (commissioning) vaqtida quvur bo'ylab bosim tushuvini o'lchash uchun U-trubkali manometr vaqtincha ulanib, nasos nabori (head) va ishqalanish yo'qotishlari loyihaga mosligini tekshirish mumkin.

Konstruktiv muvozanatlar

- *Manometr*: +Juda aniq, sodda, kalibrlash driftiga deyarli ega emas; Elektron emas, yuqori bosim yoki tez o'zgarishlar uchun amaliy emas.
- *Tenzodatchikli datchik*: +Statik va dinamik bosimni o'lchaydi, boshqaruv tizimlari uchun elektr chiqishga ega, ixcham; Qo'zg'atish quvvati talab qiladi, harorat ta'siriga sezgir va kalibrlash talab qiladi (odatda $\pm 0.1-1\%$ aniqlik).
- *Pyezoelektrik datchik*: +Yuqori chastotali bosim tebranishlari uchun juda yaxshi (tez javob, ba'zilarida MHz gacha); Statik bosimni o'qiy olmaydi, maxsus o'qish tizimini talab qiladi, odatda boshqaruv uchun emas, tahlil uchun qo'llaniladi..

4.2 Bosim o'zgartirgichlari va signalni moslashtirish

Bosimni monitoring yoki boshqaruv uchun **elektr signaliga aylantirish** kerak bo'lganda, **bosim o'zgartirgichlari** (yoki transmitterlar) qo'llaniladi. O'zgartirgich tarkibida sezuvchi element (masalan, tenzodatchikli ko'priq yoki sig'imli yacheyka) bo'ladi va u bosimga mos keladigan elektr chiqishni (kuchlanish, tok kuchi va h.k.) hosil qiladi. So'ngra bu chiqishni foydali, standart va uzoq masofalarda shovqinga chidamli qilish uchun **signalni moslashtirish** qo'llaniladi.

Bosimni elektr signaliga aylantirish

Tenzodatchikli o'zgartirgichda, ta'riflanganidek, bosim tenzodatchiklar o'rnatilgan diafragmani Wheatstone ko'prigida egadi. Xom chiqish kichik millivolt darajasidagi signal bo'lishi mumkin (masalan, 5 V qo'zg'atish kuchlanishida to'liq shkala uchun 10 mV chiqish). Signalni moslashtirish bu signalni yuqoriroq darajaga kuchaytiradi. Ba'zi datchiklar **pyezorezistiv kremniy** elementlardan foydalanadi, bunda tenzodatchikning o'zi legirlangan kremniy diafragma bo'ladi, va bular ko'pincha chiqishni kuchaytirish hamda harorat bo'yicha kompensatsiya qilishni ham bajaradigan integral sxemaning (IC) bir qismi bo'ladi. Yana bir texnologiya - **sig'imli bosim datchiklari**, bunda bosim diafragmadagi kondensator plastinalari orasidagi

masofani o'zgartiradi va sig'imni o'zgartiradi. Bu past bosimli datchiklarda (masalan, HVAC yoki barometrik datchiklarda) keng tarqalgan, chunki sig'imli sezish kichik egilishlarda ham juda sezgir bo'lishi mumkin. Sig'imdagi o'zgarish generator (oscillator) yoki ko'prik sxemasi orqali kuchlanishga aylantiriladi. **Optik bosim datchiklari** ham mavjud (masalan, interferometrik yoki fiber Bragg panjarasi turlari), lekin ular nisbatan maxsus bo'lib, elektrdan izolyatsiya talab qilinganda qo'llaniladi (masalan, MRI yoki yuqori kuchlanishli muhitlarda).

Chiqish standartlari

Sanoatda sensorlar o'zaro mos ishlashi uchun analog chiqishlar ancha avval standartlashtirilgan. Eng keng tarqalgani **4-20 mA tok kuchi** konturidir (current loop). 4-20 mA chiqishga ega bosim transmitteri o'z diapazonining 0% ida 4.0 mA, 100% ida esa 20.0 mA beradi (va oraliqda proporsional). Bu tok kuchi signali muhim afzalliklarga ega: u uzun kabel bo'ylab kuchlanish tushuviga va elektromagnit shovqinga ancha kam sezgir, chunki tok kuchi kabel qarshiligidan qat'i nazar (ma'lum chegaralarda) doimiy qoladi. U shuningdek "live-zero" xususiyatini beradi, ya'ni 0% = 4 mA bo'ladi, shuning uchun 0 mA o'qilsa, kontur uzilganini yoki quvvat yo'qolganini bilish mumkin. Quyosh stansiyasida deyarli barcha maydon bosim transmitterlari (HTF, bug' va h.k. uchun) 4-20 mA signallarni stansiyaning boshqaruv tizimi kirish kartalariga uzatadi. Yana bir keng tarqalgan standart **0-10 V** yoki **1-5 V** chiqishlaridir, ayniqsa qisqa masofalarda yoki HVAC tizimlarida. Kuchlanish chiqishlari ulash uchun sodda (analog kirish bilan o'qiladi), lekin ular masofa bo'yicha tushuv yoki shovqinga ko'proq moyil bo'lishi mumkin va odatda qabul qiluvchi tomonda yuklamaslik uchun kirish impedansi yuqori bo'lishi talab qilinadi. Ba'zi zamonaviy datchiklarda **raqamli chiqishlar** ham bor (masalan, Modbus protokolli RS485 yoki fieldbus transmitterlar), bu bosimni bevosita raqamli o'qishga imkon beradi, lekin analog 4-20 mA soddalik va ishonchlilik sababli hanz juda keng qo'llaniladi.

Signalni moslashtirish elementlari

Datchik chiqishi juda kichik mV ko'prik signali bo'ladimi yoki 4-20 mA kabi standart signal bo'ladimi, odatda quyidagi moslashtirish bosqichlari kerak bo'ladi:

- *Kuchaytirish*: Masalan, tenzodatchikli ko'prik chiqishi (0-50 mV) asbob kuchaytirgichi (instrumentation amplifier) orqali, masalan, 0-5 V gacha kuchaytiriladi yoki bevosita tok kuchi chiqishini hosil qilish uchun ishlatiladi. Kuchaytirgich shovqini va drifti past bo'lishi kerak.

- *Filtrlash:* Bosim signallarida shovqin bo'lishi mumkin (mexanik vibratsiya yoki elektr xalaqiti sababli). Bosim boshqaruv uchun ishlatilsa va jarayon yuqori chastotali tarkiblarni talab qilmasa, chiqishni silliqlash uchun ko'pincha past chastotali filtr (low-pass filter) qo'llaniladi. Masalan, nasos uchun bosim boshqaruv konturi boshqaruv amali uchun ahamiyatsiz bo'lgan yuqori chastotali tebranishlarni filtrlashi mumkin. Biroq filtrlashni javob vaqti bilan muvozanatlash kerak, juda kuchli filtrlash aslida muhim bo'lgan tez bosim sakrashini yashirib qo'yishi mumkin (masalan, suv zarbasi - water hammer hodisasi). Kritik qo'llanmalarda ikki xil chiqish berilishi mumkin: boshqaruv uchun filtrlashdan o'tgani va sakrashlarni ogohlantirish (alarm) uchun filtrlanmagani.
- *Chiziqlilashtirish va kompensatsiya:* Signalni moslashtirish bloklari ko'pincha datchik nochiqliligi va harorat ta'siri uchun sxematik yoki raqamli tuzatishni o'z ichiga oladi. Masalan, pyezorezistiv o'zgartirgichning noli atrof-muhit harorati bilan siljishi mumkin, moslashtirish elektronikalari datchik chipidagi ichki harorat datchiklari yordamida buni tuzatadi va “nolning harorat koeffitsienti $< 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ ” kabi spetsifikatsiyani ta'minlaydi.
- *Izolyatsiya:* Ko'plab sanoat tizimlarida yer konturlari (ground loop)ning oldini olish va yuqori umumiy rejim kuchlanishlaridan (common-mode) himoyalash uchun **signal izolyatsiyasi** ishlatiladi. Bosim transmitteri chiqish bosqichini kirish/mexanik tomondan elektr jihatdan izolyatsiya qilishi mumkin. Bu bosim o'lchovlari uchun odatda tipik bo'lmasa ham, to'liqlik uchun aytganda, ayrim obyektlarda datchiklar yuqori potentsiallarda joylashgan uskunalarda bo'lishi mumkin.
- *Shovqinga chidamlilik:* Tok kuchi konturlaridan foydalanish shovqinga chidamlilikni tabiatan oshiradi (chunki shovqin hosil qilgan tok kuchlari 4-20 mA ga nisbatan kichik bo'ladi). Bundan tashqari, EMI ni kamaytirish uchun burama juft (twisted pair) sim ishlatiladi va ko'pincha ekranlash (shielding) qo'llaniladi, ekran odatda bir tomondan yerga ulanadi. Quyosh fermalarida muhit shovqinli bo'lishi mumkin, chunki PV inverterlarning kommutatsiyasi yoki yirik harakatlanuvchi uskunalalar mavjud bo'ladi; shu sababli bosim transmitter kabeli odatda tuba (conduit) yoki kabel lotoklarida yuqori quvvatli kabellardan alohida yotqiziladi, ekranlangan kabel va to'g'ri yerga ulash esa standart amaliyot hisoblanadi.
- *Transientdan himoya:* Maydon transmitterlarida odatda chaqmoq yoki kommutatsiya sakrashlaridan (surge) himoya qilish uchun himoya elementlari bo'ladi. Bu katta ochiq maydonli obyektlarda, masalan quyosh maydonlarida,

uzun kabellar sakrashlarni “ushlab” qolishi mumkin bo'lgani uchun muhim bo'ladi..

Xulosa qilib aytganda, “bosim o'zgartirgichi” odatda sezuvchi element va asosiy signal chiqishini anglatadi, “bosim transmitteri” esa ko'pincha 4-20 mA chiqish va kuchli moslashtirishga ega to'liq yechimni bildiradi. Signalni moslashtirish dizaynining maqsadi PLC yoki kontroller ishonchli talqin qila oladigan, bosimga proporsional, **standart** va **shovqinsiz signalni** hosil qilishdir. Masalan, 0-10 bar diapazonli bosim transmitteri 0 bar da 4 mA va 10 bar da 20 mA berishi mumkin. Boshqaruv tizimi 12 mA ni qabul qilsa, jarayon diapazonning 50% ida ekanini biladi (5 bar). Buni standartlashtirish istalgan brend transmitterni 4-20 mA kutadigan istalgan kontroller analog kirishiga ulash imkonini beradi.

Shovqinni filtrlash misoli:

Quyosh issiqlik stansiyasida oziqlantiruvchi suv (feedwater) nasosi chiqishidagi bosim transmitteri nasos impeller pichoqlari sababli tez tebranishlarni sezishi mumkin (masalan, 100 Hz atrofida kichik ripple). Transmitterning analog elektronikalari bu ripple ni o'rtachalash uchun kesish chastotasi ~10 Hz bo'lgan filtrni qo'llashi mumkin, shunda boshqaruv konturi (u, masalan, 1 Hz da ishlashi mumkin) to'liq shovqinni ko'rmaydi. Biroq juda agressiv filtr kavitatsiya boshlanishini ham berkitib qo'yishi mumkin (kavitatsiya ham bosim tebranishlarini keltirib chiqarishi mumkin). Shu sababli muhandislar filtr vaqt doimiylarini ehtiyotkor tanlaydi. Ba'zida raqamli “damping” sozlamalari beriladi, masalan transmitterga 1 soniya “damping” berib sozlash mumkin, bu bosimni amalda 1 soniya bo'yicha o'rtachalashini anglatadi. Bu displeylardagi ko'rsatmalarni barqaror qilish uchun foydali bo'ladi, lekin yuqori tez javob kerak bo'lganda o'chirib qo'yilishi mumkin.

Keng tarqalgan chiqish standartlari bo'yicha qisqa takrorlash:

4-20 mA va 0-10 V dan tashqari yana bir nechta standartlar mavjud, jumladan **1-5 V** (250 Ω rezistor orqali 4-20 mA ga mos keladi), **0.5-4.5 V** ratiometrik (ko'pincha 5 V bilan quvvatlanadigan avtomobil datchiklarida), va raqamli protokollar (PCB yig'malariga integratsiya uchun datchiklarda I²C, SPI, yoki smart transmitterlarda 4-20 mA kontur ustiga qo'shiladigan HART, bunda tok konturi ustiga qo'shimcha raqamli ma'lumot “ustma-ust” uzatiladi). Quyosh sanoatida stansiya darajasidagi asbob-uskunalarda asosan 4-20 mA yoki ba'zan 0-10 V ishlatiladi, chunki ular standart sanoat boshqaruv apparatlari bilan mos interfeysga ega.

4.3 Bosim datchiklarini kalibrlash va metrologik kuzatuvchanlik

Harorat datchiklarida bo'lgani kabi, bosim asboblari ham ko'rsatmalari aniq va ishonchli bo'lishi uchun kalibrlashni talab qiladi. Kalibrlash datchik ko'rsatishini ma'lum etalon bosim bilan solishtirishni va har qanday chetlanishni sozlash yoki hujjatlashtirishni o'z ichiga oladi. Bosim uchun kalibrlash standartlarining ierarxiyasi mavjud bo'lib, u juda fundamental birlamchi standartlardan tortib maydonda tekshirish qurilmalarigacha davom etadi:

Yuk-porshenli manometr (birlamchi etalon)

Yuk-porshenli manometr bosim kalibrlashi uchun klassik birlamchi etalon hisoblanadi. U quyidagi tenglamadan foydalanadi:

$$P = \frac{F}{A}$$

Qurilmada kesim yuzasi A ma'lum bo'lgan porshen mavjud bo'ladi. Siz unga kalibrlangan yuklarni $F = mg$ tarzida yuklaysiz. Yuklar porshenni pastga bosadi, porshen esa o'ziga ulangan kameradagi suyuqlikni (moy yoki gaz) bosim ostiga keltiradi. Muvozanat holatida (porshen erkin “suzib” turganda) kameradagi bosim aynan kuchning yuzaga nisbatiga teng bo'ladi. Yuk-porshenli manometrlar juda yuqori aniqlikdagi bosimlarni hosil qila oladi (odatdagi noaniqliklar o'qishning 0.01% i tartibida yoki undan ham yaxshi bo'lishi mumkin). Bosim o'zgartirgichni kalibrlash uchun siz uni yuk-porshenli manometrning chiqish portiga ulaysiz, ma'lum bosimlar ketma-ketligini hosil qilish uchun yuklarni qo'shasiz (masalan, 0 bar, 5 bar, 10 bar...) va o'zgartirgich ko'rsatmalarini qayd etasiz. Farq sizga kalibrlash tuzatishlarini beradi. Yuk-porshenli manometrlar ko'pincha maydonda bevosita emas, balki laboratoriya yoki asbob-uskunalar ustaxonasida ishlatiladi (ular ancha og'ir bo'ladi va ehtiyotkor tekislash hamda qizdirib olishni talab qiladi). Shunga qaramay, obyektни ishga tushirish (commissioning) paytida yuqori bosimli transmitterlarni (masalan, 100 bar bug' datchiklari) joyida kalibrlash uchun ko'chma yuk-porshenli manometr olib kelinishi mumkin yoki ko'proq uchraydigani, transmitter yechib olinadi va kalibrlash laboratoriyasiga olib boriladi.

Laboratoriya va maydondagi kalibrlash tartiblari

Laboratoriyada yuk-porshenli manometrlardan tashqari, turli bosimlarni o'rnatish mumkin bo'lgan va ichida aniq etalon mavjud bo'lgan aniqlikdagi **bosim kontrolleri/kalibratori** kabi avtomatlashtirilgan qurilmalar ham ishlatiladi.

Maydonda yoki obyekt joyida kalibrlash (aniqlik talabi pastroq bo'lganda) uchun ko'chma bosim kalibratorlari ishlatiladi, ularda ko'pincha qo'l nasosi va yuqori aniqlikdagi etalon manometr bo'ladi. Masalan, quyosh maydonidagi nasos stansiyasida 10 bar bosim datchigini maydonda kalibrlash uchun muhandis qo'l nasosi yordamida bosimni bir vaqtning o'zida ham datchikka, ham kalibrlangan raqamli etalon manometrغا beradi va bir nechta nuqtalarda (0, 5, 10 bar) ko'rsatmalarni solishtiradi. Agar datchikda offset yoki diapazon (span) xatoligi bo'lsa, u trim potensiometrلar orqali yoki “aqlli transmitter” bo'lsa raqamli konfiguratsiya orqali sozlanadi. **Bosim datchigi kalibrlashi** odatda chiziqlilikni tekshirishni ham o'z ichiga oladi (oraliq nuqtalar “chiziq” ustiga tushadimi) va gisterezisni ham tekshiradi (bosimni oshirib keyin pasaytirib, ko'rsatmalar farq qiladimi). Laboratoriyada **harorat ta'siri** ham hisobga olinadi, ba'zan kalibrlash xona haroratida va ehtimol yana bir-ikki boshqa haroratda ham bajariladi, shunda transmitterning ichki kompensatsiyasi ishlashi tekshiriladi.

Metrologik kuzatuvchanlik

Ishlatiladigan etalon (yuk-porshenli manometr, etalon bosim o'lchagich) o'zi ham kalibrlangan va milliy standartلarga metrologik kuzatuvchan bo'lishi muhim (masalan, NIST). Odatda yuk-porshenli manometr sertifikat bilan keladi, unda har bir yukning aniq massasi va porshenning samarali yuzasi (mahalliy gravitatsiya, harorat va h.k. uchun tuzatishlar bilan) ko'rsatiladi, shunda haqiqiy bosimni hisoblash mumkin bo'ladi. Metrologik kuzatuvchanlik shuni anglatadiki, agar quyosh stansiyasidagi bosim transmitteri 50.0 bar deb ko'rsatsa, bu qiymat kalibrlash bosqichlari orqali fundamental standartلarga bog'lanishi mumkin bo'ladi, va bu ishlash kafolatlari yoki xavfsizlik chegaralari uchun o'lchovلarga ishonch beradi.

Yuqori bosimli tizimlarda (masalan, elektr stansiyalaridagi o'nlab yoki yuzlab bar bug' liniyalari) kalibrlash xavfsizlik jihatlariga ham ega. Ko'pincha transmitter jonli (live) tizimda emas, sinov stendida kalibrlanadi. Agar joyida (in situ) bajarilsa, liniya ajratilishi va bosimsizlantirilishi kerak bo'ladi. Bosim kalibrlash uskunalari hosil qilinadigan maksimal bosimdan yuqoriroq bosimga mo'ljallangan bo'lishi shart, shlang va fittinglar esa xavfli sizib chiqish yoki yorilishni oldini olish uchun yaxshi holatda bo'lishi kerak. Texniklar himoya ko'zoynak taqadi va bosimni sekin tushirish (bleed) tartiblariga amal qiladi va h.k. Yuqori bosim uchun yuk-porshenli manometrlar ishchi suyuqlik sifatida moydan foydalanadi (moyning siqiluvchanligi past va u porshenni moylaydi), biroq bu moyni tozalikka talab yuqori bo'lgan jarayon liniyalariga kiritib yubormaslik kerak (shu sababli kalibrlash odatda off-line qilinadi yoki adapterلar orqali bajariladi).

Turli datchik turlarini kalibrlash

Manometrlar yoki mexanik o'lchagichlar uchun kalibrlash ma'lum bosimlarni berish (kalibrator yoki yuk-porshenli manometr orqali) va ma'lum nuqtalarda strelka qanchaga og'ishini qayd etishdan iborat bo'lishi mumkin. Ularni ko'pincha Bourdon trubkasini biroz bukish yoki nol nuqtasida sozlash vintini burash orqali sozlash mumkin va h.k., biroq ko'plab Bourdon o'lchagichlarda span bo'yicha sozlash bo'lmaydi, shuning uchun xatolik ko'pincha faqat hujjatlashtiriladi. Amaliyotda mexanik o'lchagichlar sezilarli og'igan bo'lsa, ularni nozik sozlashdan ko'ra ko'proq almashtirib yuboriladi, agar ular yuqori darajadagi sinov o'lchagichlari bo'lmasa.

Kalibrlash davriyligi

Bosim datchiklari o'lchovda siljish (drift) qilishi mumkin va qayta kalibrlash davriyligi qo'llanilish va talab etilgan aniqlikka bog'liq bo'ladi. Quyosh issiqlik stansiyasidagi kritik bosim transmitteri uchun (masalan, ortiqcha bosimdan himoya qilish uchun himoya klapanlarini ishga tushiradigan transmitter) yillik kalibrlash tekshiruv standartlar yoki sug'urta talablariga ko'ra majburiy bo'lishi mumkin. Ko'plab stansiyalar kritik asboblarni rejalashtirilgan to'xtashlar vaqtida kalibrlaydi. Kritik bo'lmaganlari 2-3 yilgacha ishlashi mumkin. Zamonaviy raqamli transmitterlarda drift juda kichik bo'lishi mumkin (masalan, 5 yilda $\pm 0.1\%$), lekin kalibrlash baribir yaxshi amaliyot hisoblanadi.

Hujjatlashtirish va standartlar

Kalibrlash tartiblar bo'yicha bajarilishi kerak, va bu tartiblar ko'pincha standartlarda bayon qilingan bo'ladi (masalan, ISO 17025 yoki ISA ko'rsatmalari). Kalibrlash sertifikat beriladi, unda "as found" ko'rsatmalar, kiritilgan tuzatish yoki bajarilgan sozlash, va "as left" ko'rsatmalar, shuningdek atrof-muhit sharoitlari (kalibrlash paytidagi harorat va h.k.) ko'rsatiladi, shunda to'liq shaffoflik ta'minlanadi. Bu sifat tizimlari (ISO 9001) uchun va asbobga asoslangan har qanday qaror (masalan, bosim xavfsizlik limitidan past bo'ldimi?) dalillar bilan asoslanishi uchun muhim.

Faraz qilaylik, biz quyosh issiqlik stansiyasidagi ob-havo stansiyasi barometrida DNI (direct normal irradiance) hisoblari uchun ishlatiladigan bosim transmitterini kalibrlayapmiz (chunki irradiatsiya hisoblari atmosfera bosimidan foydalanadi). Biz 1013 mbar da birlamchi standartga nisbatan kalibrlangan ko'chma kalibratoridan foydalanishimiz mumkin. Bizning transmitterimiz haqiqiy qiymat 1013 bo'lganda

1010 mbar ko'rsatadi, biz uni sozlaymiz. Bizning kalibratorimiz NIST ga metrologik kuzatuvchan sertifikatga ega bo'lgani uchun, transmitterimiz endi NIST ga metrologik kuzatuvchan holda ± 0.5 mbar ichida aniq deb ayta olamiz. Agar keyinchalik energiya hisoblari aniq bosimni talab qilsa, biz bu qiymatga ishonch bilan tayanamiz.

Xulosa qilib aytganda, bosim datchiklarini kalibrlash stansiya xavfsizligi va ishlashini ta'minlaydi. Usullar sodda (manometr bilan solishtirish) usullardan tortib murakkab (yuk-porshenli manometrlar) usullargacha boradi. Muntazam kalibrlash va kalibrlash zanjirini tushunish orqali muhandislar bosim o'lchovlarini ishonchli saqlaydi, bu quyosh maydonidagi issiqlik uzatuvchi suyuqlik bosimini nasos kavitatsiyasidan saqlash uchun aniq ushlab turish bo'ladimi, yoki himoya klapani to'g'ri setpoint da ochilishini ta'minlash bo'ladimi, baribir.

Savol Javoblar - Bosimni o'lchash:

- 1. Quyosh issiqlik stansiyasidagi moy liniyasidagi Bourdon trubkali o'lchagich 15.0 bar ko'rsatmoqda, yonidagi yaqinda kalibrlangan raqamli bosim transmitteri esa 14.5 bar ko'rsatmoqda. Bu farqqa nima sabab bo'lishi mumkin, va qaysi asbob ko'rsatishi to'g'ri bo'lishi ehtimoliy?*

Javob: Ehtimoliy sabablar qatoriga Bourdon o'lchagichdagi kalibrlash drifti yoki gisterezis, shkalani o'qishda parallaks xatoligi, yoki o'lchagichning atrof-muhit haroratidan ta'sirlanishi kiradi (mexanik o'lchagichlarda siljish bo'lishi mumkin). Raqamli transmitter yaqinda kalibrlangan, shuning uchun u aniqroq bo'lishi ehtimoliy. Bourdon o'lchagichlar muntazam kalibrlanmasa bir necha foizgacha xato qilishi mumkin. Shuning uchun transmitterning 14.5 bar ko'rsatishi ehtimol haqiqiy bosimdir, analog o'lchagich esa drift yoki kalibrlash xatoligi sababli +0.5 bar yuqori ko'rsatayotgan bo'lishi mumkin. Bourdon o'lchagichni kalibrlash yoki almashtirish tavsiya etiladi.

- 2. Nega katta quyosh stansiyasi o'rnatmalarida bosim transmitterlari uchun 4-20 mA chiqish ko'pincha 0-5 V chiqishdan afzal ko'riladi?*

Javob: Chunki 4-20 mA tok kuchi konturi uzun kabel masofalarida elektr shovqini va kuchlanish tushuviga kamroq sezgir bo'ladi. Tok kuchi signali shuni ta'minlaydiki, kabel yuzlab metr bo'lsa ham yoki elektr jihatdan shovqinli muhitdan o'tsa ham (masalan, invertorlar yoki motorlar yaqinida), o'qish aniq qoladi. Bundan tashqari, 4 mA "live zero" ulanish nosozligini aniqlash imkonini beradi (agar kontur uzilsa, signal 0 mA ga tushadi va bu aniq nosozlik). 0-5 V signali esa sim qarshiligi sababli kuchlanish yo'qotishiga va elektromagnit

shovqin ta'siriga uchrashi mumkin, hamda 0 V bosim 0 ekanini ham, sim uzilganini ham anglatishi mumkin, buni farqlash oson emas.

3. *0-40 bar bosim transmitterini yuk-porshenli manometr yordamida qanday kalibrlagan bo'lar edingiz?*

Javob: Avval transmitterni jarayondan ajrataman va uni yuk-porshenli manometrning bosim portiga ulayman. Aniqlik uchun qurilma barqaror, tekis yuzada turganini tekshiraman va kameraga yengil mineral moyini qo'llayman (yuk-porshenli qurilmalar uchun odatiy). Yuklarsiz holatda transmitter nol ko'rsatayotganini tasdiqlayman (yoki offset bo'lsa qayd etaman). Keyin, masalan, 10 bar ga mos yuklarni qo'yaman va porshen “suzib” turguncha qurilmani nasoslayman (bu muvozanat hosil bo'lganini bildiradi). Shu nuqtada bosim aynan 10.000 bar bo'ladi (mahalliy gravitatsiya va harorat bo'yicha qurilma sertifikatidagi tuzatishlar bilan). Men transmitter chiqishini (mA yoki raqamli ko'rsatish) qayd etaman va zarur bo'lsa nol/span ni 10.0 bar ga mos qilish uchun sozlayman. Men 20 bar, 30 bar va 40 bar nuqtalarida ham shu jarayonni takrorlayman, har safar kerakli bosimni hosil qilish uchun yuklarni qo'shaman (porshenni “suzdirib” muvozanatga keltiraman). Men pastdan yaqinlashaman va ehtimol bosimni tushirib, yuqoridan ham yaqinlashib gisterezisni tekshiraman. Har bir nuqtada transmitter ko'rsatishini yuklardan olingan ma'lum bosim bilan solishtiraman, va agar chetlanish ruxsat etilgan xatolikdan katta bo'lsa, transmitter kalibrlashini (trim yoki dastur orqali) shu sinov nuqtalarida to'g'ri ko'rsatadigan qilib sozlayman. Oxirida “as left” ko'rsatmalarni hujjatlashtiraman, bunda transmitter diapazon bo'yicha spetsifikatsiya ichida ekanligi ko'rsatiladi va etalon sifatida metrologik kuzatuvchan yuk-porshenli manometr ishlatilgani qayd etiladi. Xavfsizlik nuqtai nazaridan, nuqtalar orasida bosimni tushirganda ehtiyotkor bo'laman va yuklarni toza qo'l bilan ushlayman (xatolik qo'shmaslik uchun).

5. Oqim sarfini o'lchash usullari

5.1 Differensial bosim, turbinali, ultrasonik va vorteks oqim o'lchagichlar

Suyuqliklar (suyuqliklar yoki gazlar) oqim sarfini turli prinsiplarga asoslanib o'lchash mumkin. Ushbu bo'limda to'rtta keng tarqalgan tur ko'rib chiqiladi, ularning har biri o'ziga xos ishlash prinsipi, afzallik/kamchiliklari va quyosh issiqlik konturlari hamda HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) tizimlarida mos qo'llanish sohalariga ega..

Differential Pressure Flowmeters

Ular **Bernulli prinsipi** asosida ishlaydi va bosim farqini oqim tezligiga aylantiradi. Oqim yo'lidagi toraytirish elementi (masalan, **diafragma plastinasi**, **Venturi trubkasi** yoki **oqim soplosi**) bosim tushuvini hosil qiladi va bu oqim sarfi bilan bog'liq bo'ladi. Masalan, diafragma plastinasi quvur ichiga o'rnatilgan, cheti o'tkir teshikli yupqa plastina bo'lib, suyuqlik teshikdan o'tayotganda uning tezligi ortadi va bosim pasayadi. Yuqori oqim (upstream) va quyi oqim (downstream) nuqtalaridagi ulanishlar bosim farqi ΔP ni o'lchaydi. Shundan so'ng oqim sarfi Q quyidagicha hisoblanadi:

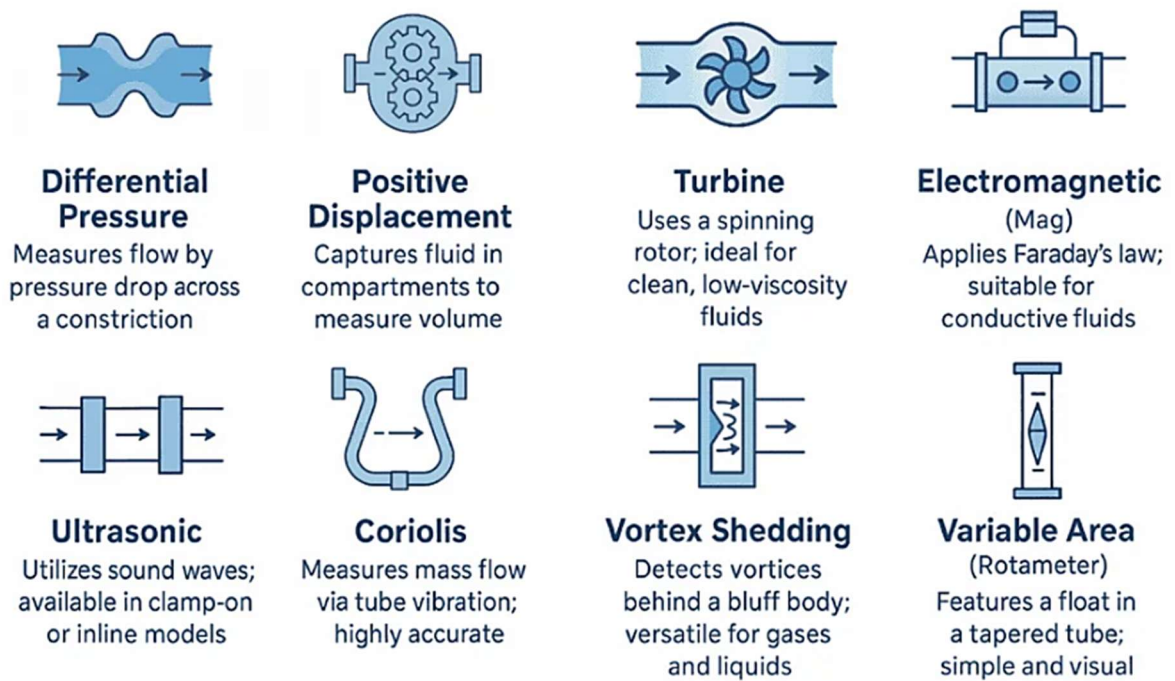
$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

suyuqliklar uchun (gazlarda zichlik ρ bosim bilan o'zgaradi, shuning uchun siqiluvchanlik hisobga olinadi). C - oqim koeffitsienti (discharge coefficient) bo'lib, u (~ 0.6 o'tkir qirrali diafragma uchun) ideal bo'lmagan holatlarni tajriba asosida hisobga oladi va Reynolds soni hamda diafragma geometriyasiga bog'liq bo'ladi. **Venturi trubkalari** silliqroq alternativ hisoblanadi: Venturi da yaqinlashuvchi qism, nov (throat) va kengayuvchi qism bo'ladi, va u bosimni samaraliroq tiklaydi. Uning prinsipi bir xil, kirishda va novdagi (eng past bosim nuqtasidagi) bosim o'lchanadi va oqim sarfi aniqlanadi. Venturi lar C koeffitsienti bo'yicha yuqoriroq qiymatga ega (~ 0.98) va diafragma nisbatan doimiy bosim yo'qotishi pastroq bo'ladi. **Oqim soplolari** bu ikkisining o'rtasidagi yechim bo'lib, odatda bug' oqimini o'lchashda ishlatiladigan, biroz silliqlashtirilgan diafragma turidir. Bu DP oqim o'lchagichlar sanoatda juda keng tarqalgan, shu jumladan quyosh issiqlik konturlarida ham. Masalan, parabolik nov (nov) stansiyasida diafragma plastinali oqim o'lchagich har bir kollektor konturi bo'ylab issiqlik uzatuvchi moy oqim sarfini o'lchab, oqim sarfi

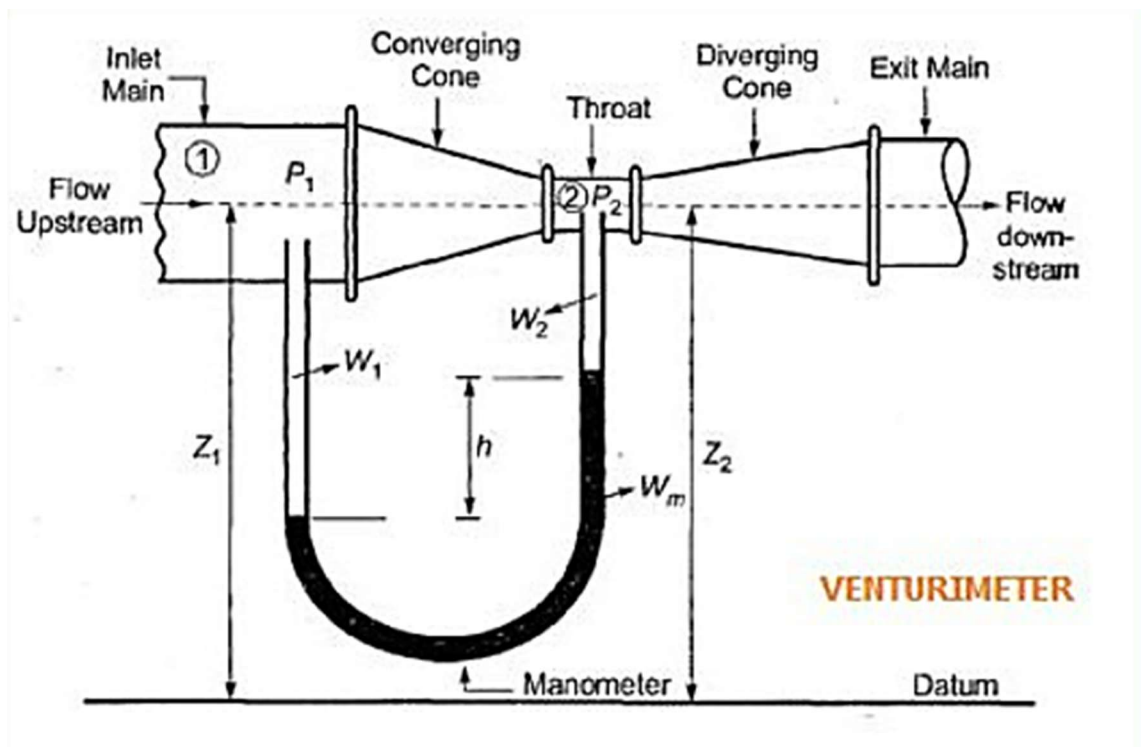
loyihaviy qiymatlar ichida ekanini monitoring qilish uchun ishlatilishi mumkin (issiqlik olish to'g'ri bo'lishini ta'minlash uchun). Diafragma o'lchagichlar nisbatan sodda va issiq suyuqliklar uchun yuqori haroratli materiallardan tayyorlanishi mumkin. HVAC kontekstida DP oqim o'lchagichlar (masalan, diafragma yoki pitot trubkasi massivi) havo kanallarida havo oqimini yoki sovitilgan suv konturlarida suv oqim sarfini o'lchaydi.

Harakatlanuvchi qismlar yo'q (faqat ishonchli differensial bosim transmitteriga ehtiyoj bor), standartlashgan va yaxshi o'rganilgan texnologiya (masalan, ISO 5167 diafragma/Venturi hisoblarini standartlashtiradi), hamda yuqori harorat va bosimlarda juda mustahkam bo'lishi mumkin. Ular katta quvur diametrlari uchun ham nisbatan yaxshi moslashadi (ayniqsa Venturi lar). Biroq, ular **doimiy bosim yo'qotishini** keltirib chiqaradi (diafragma plastinasi plastina ortida turbulentlik sababli nasos energiyasining bir qismini sezilarli "yo'qotishi" mumkin). Aniqlik kalibrlangan sharoitlarni saqlashga bog'liq, masalan, oqim profili yaxshi shakllanishi uchun ma'lum upstream to'g'ri quvur uzunligi talab qilinadi (odatda 10-20 quvur diametri). Past oqimlarda (Reynolds soni kichik bo'lganda) discharge koeffitsienti o'zgaradi, shuning uchun bu diapazon uchun mos dizayn qilinmasa aniqlik yomonlashadi. Suyuqlik xossalari (zichlik, viskozitet) kutilganidan ko'proq o'zgarsa, kompensatsiya qilinmasa ko'rsatish ham o'zgaradi. Biroq ko'plab holatlarda (masalan, zichligi nisbatan barqaror bo'lgan suv yoki moy oqim sarfini o'lchashda) DP o'lchagichlar amaliy "ishchi" yechim hisoblanadi. Quyosh issiqlik konturlari ko'pincha turbulent rejimda ishlaydi, bu yerda diafragma kalibrlashlari barqaror bo'ladi (odatda $Re > 10^5$). Bundan tashqari, DP o'lchagichlarda ΔP va oqim sarfi o'rtasida **kvadrat ildizli bog'lanish** mavjud, ya'ni past oqimlarda DP signali yuqori oqimlarga nisbatan juda kichik bo'ladi (bu turndown nisbatini cheklashi mumkin, odatda diafragmalar uchun 3:1 yoki 4:1 amaliy turndown hisoblanadi, yuqori aniqlik saqlanganda). Venturi o'lchagichlarda turndown yaxshiroq bo'ladi.

TYPES OF FLOW METERS



Rasm 23: Oqim o'lchagichlar turlari



Rasm 24: Venturi turbkali oqim o'lchagich - Venturimeter

Turbinali oqim o'lchagichlar

Turbinali oqim o'lchagichda oqim ichida pichoqli rotor (kichik propellerga o'xshash) bo'ladi. Suyuqlik oqganda u turbina rotorini oqim tezligiga proporsional tezlikda aylantiradi. Magnit yoki ultrasonik pickup pichoqlarning o'tish chastotasini sezadi va natijada chastota chiqishi hosil bo'ladi, bu volumetrik oqim sarfiga proporsional bo'ladi. Turbinali o'lchagichlar diapazon bo'yicha oqimni juda bevosita va chiziqli o'lchaydi. Ular **yuqori aniqlik** bilan mashhur (odatda o'qishning $\pm 0.5\%$ i yoki undan ham yaxshiroq) va **javob tezligi** yuqori. Ular toza suyuqliklar bilan yaxshi ishlaydi (yoki mos tuzatishlar bilan gazlar uchun ham). Masalan, laboratoriyadagi quyosh issiqlik sinov konturida turbinali o'lchagich suv yoki moy oqim sarfini aniq o'lchab, energiya balansi hisoblari uchun ishlatilishi mumkin ($\text{massa sarfi} * C_p * \Delta T$). Amaldagi quyosh stansiyasida turbinali o'lchagichlar yoqilg'i liniyalarida (agar zaxira isitkich yoqilg'i ishlatasa) yoki issiqlik uzatuvchi suyuqlik juda toza bo'lsa HTF liniyasida ishlatilishi mumkin. Biroq ko'plab HTFlar (masalan, termik moylar) past haroratlarda qovushqoq bo'lishi mumkin, bu turbinali o'lchagich ishiga ta'sir qiladi (ular viskozitetga sezgirroq va shu holat uchun kalibrlash talab qiladi). Shuningdek, agar suyuqlikda mayda zarrachalar bo'lsa yoki quvur zanglasa, zarrachalar turbina rotorini tiqib qo'yishi yoki yeyishi mumkin. Shu sababli turbinali o'lchagichlar **toza suyuqlikni** va ba'zan upstream tomonda filtr/straynerni talab qiladi. HVAC da turbinali oqim datchiklari ba'zan kichik diametrli suyuqlik liniyalarida (masalan, binodagi sovitilgan suv liniyasida) ularning yaxshi diapazon qamrovi sababli ishlatiladi.

Ular yuqori aniqlik va takrorlanuvchanlikni beradi va barqaror, toza oqimlar uchun qulay. Ular to'g'ri tanlansa nisbatan keng diapazonni ham qamrab oladi (turndown 10:1 yoki undan yuqori bo'lishi mumkin). Biroq harakatlanuvchi qismlar eskirishi mumkin, vaqt o'tishi bilan podshipnik ishqalanishi ortadi yoki pichoqlar shikastlanadi, bu esa kalibrlash driftini keltirib chiqaradi. Masalan, quyosh maydonidagi turbinali o'lchagich rotor podshipniklari eskirgani sari bir xil oqimda sekinroq aylanib, asta-sekin pastroq ko'rsatishi mumkin. Ular viskozitet o'zgaradigan suyuqliklar yoki ikki fazali oqimlar uchun ham yaxshi emas (pufakchalar o'lchovni buzishi mumkin). Yuqori haroratda material tanlovi juda muhim (yuqori haroratli podshipniklar va h.k. kerak bo'ladi, bu qimmatga tushishi mumkin). Odatda turbinali o'lchagichlar to'g'ridan-to'g'ri 400 °C moy liniyasida emas, balki stansiyaning yordamchi qismlarida (masalan, o'rtacha sharoitdagi yoqilg'i yoki suv oqimlari) ko'proq uchraydi, bu yerda DP yoki ultrasonik o'lchagichlar mustahkamroq bo'lishi mumkin.

Ultrasonik oqim o'lchagichlar

Ultrasonik oqim o'lchagichlar oqimni suyuqlik orqali tovush to'lqinlarini uzatish va ularning oqim bilan o'zaro ta'sirini tahlil qilish orqali o'lchaydi. Ikki asosiy tur mavjud:

- *Tranzit-vaqtli ultrasonik*: Ikki transduser quvurga o'rnatiladi (tashqaridan qisqich bilan mahkamlab yoki ichkariga kiritib). Ular navbatma-navbat akustik impulslar yuboradi, biri oqim bo'yicha, biri oqimga qarshi. Oqim mavjud bo'lsa, tovush to'lqini oqim yo'nalishida tezroq, oqimga qarshi esa sekinroq tarqaladi. O'lchagich oqim bo'yicha va oqimga qarshi **tranzit vaqtlar orasidagi farq Δt** ni o'lchaydi. Bu vaqt farqi oqim tezligiga proporsional bo'ladi. Tranzit-vaqtli o'lchagichlar ultratovush tarqaladigan **toza suyuqliklar** (suyuqlik yoki gaz) uchun yaxshi ishlaydi. Ular invaziv bo'lmagan bo'lishi mumkin (Qisqichli ultratovushli turlari quvur tashqarisiga mahkamlanadi, modernizatsiya ishlari yoki quvurni teshib kirish istalmaganda juda qulay). Masalan, quyosh issiqlik stansiyasida Qisqichli ultratovushli oqim o'lchagichlar katta diametrli eritilgan tuz quvurlarida yoki sovitish suvi quvurlarida vaqtinchalik o'lchovlar uchun yoki aniqlik yetarli bo'lsa doimiy o'lchov uchun ishlatilishi mumkin. Zamonaviy ko'p yo'lli (multi-beam) ultrasonik o'lchagichlar 2-4 o'lchash yo'liga ega bo'ladi va suyuqliklar uchun yuqori aniqlikka ($\pm 1\%$ yoki undan yaxshi) erisha oladi. Ular deyarli bosim tushuvini hosil qilmaydi va harakatlanuvchi qismlar yo'q, bu katta afzallik. Binolardagi **quyosh HVAC tizimlarida** Qisqichli ultratovushli datchiklar sovitilgan suv liniyalarida quvurlarni kesmasdan oqim sarfini o'lchashi mumkin, bu esa qulay.
- *Doppler ultrasonik*: Bu tur zarrachalar yoki pufakchalar bo'lgan suyuqliklar uchun ishlatiladi. U ultrasonik nurni yuboradi va harakatlanuvchi sochuvchi obyektlardan (zarrachalar, pufakchalar) qaytgan signalning chastota siljishini kuzatadi. Chastota siljishi (Doppler siljishi) tezlikni beradi. Doppler oqim o'lchagichlar suyuqlikda ma'lum loyqalilik yoki ikkinchi faza bo'lishini talab qiladi va odatda tranzit-vaqtli turlarga nisbatan aniqligi pastroq bo'ladi, lekin tranzit-vaqt ishlaymay qoladigan joylarda ishlashi mumkin (masalan, oqova suv yoki shlam). Quyosh kontekstida Doppler kamroq uchraydi (quyosh stansiyalaridagi ko'p suyuqliklar odatda toza saqlanadi; agar faza almashuvchi material shلامي bo'lgan issiqlik akkumulyatsiya muhiti o'lchansa, Doppler qo'llanishi mumkin).

Ultrasonik o'lchagichlar juda katta quvur diametrlarida ishlay oladi (masalan, quyosh quvvat minorasida sovitish suvi quvuri 2 m diametr bo'lishi mumkin, ultrasonik transduserlarni tashqaridan mahkamlash orifis yoki mag o'lchagichni juda katta qilib qurishga nisbatan ancha arzon bo'ladi). Ular oqimni to'smaydi, shuning uchun bosim yo'qotishi yo'q va ifloslanishni (fouling) kuchaytirish xavfi ham yo'q.

Ular yuqori haroratlar uchun ham moslashtirilishi mumkin, masalan, transduserlarni issiq suyuqlikdan uzoqroq joyga mahkamlash (ultratovush to'lqin yo'riqchilari - waveguides orqali) yoki izolyatsiya ustidan o'rnatish orqali. Ular yaxshi turndown imkoniyatiga ega, tranzit-vaqtli o'lchagichlarda ko'pincha 20:1 yoki undan yuqori turndown bo'ladi, chunki vaqtni o'lchash texnikalari raqamli elektronika bilan ancha rivojlangan. Biroq suyuqlik ultratovushni yaxshi o'tkazishi kerak, masalan 565 °C dagi eritilgan tuz odatiy transduserlar uchun murakkab bo'lishi mumkin (maxsus yuqori haroratli coupling materiallar va transduserlar kerak bo'ladi, hamda tuzda tovush so'nishi katta bo'lishi mumkin). Xuddi shuningdek, gaz oqimida tranzit-vaqtli ultrasonik ishlaydi, lekin yetarli aniqlik uchun uzun yo'l yoki yuqori chastota talab qilinadi, va oqim profilini hisobga olish uchun odatda ko'p yo'lli dizaynlar kerak bo'ladi. Ular diafragma plastinalari yoki oddiy turbinalarga nisbatan nisbatan qimmatroq. Qisqichli ultratovushli turlari maydon sharoitida biroz pastroq aniqlik berishi mumkin (masalan, $\pm 2\%$ atrofida) va o'rnatishga sezgir (to'g'ri yo'naltirish va quvur bilan yaxshi akustik kontakt talab qilinadi). Biroq ularning invaziv bo'lmagan xususiyati ko'pincha bosim tushuviga yo'l qo'yib bo'lmaydigan yoki quvurni o'zgartirish mumkin bo'lmagan o'lchovlarda o'zini oqlaydi. Quyosh issiqlik konturlarida suyuqliklar issiq va biroz iflos bo'lishi mumkin (termik moylar vaqt o'tishi bilan degradatsiya qilib mayda pufakchalar/zarrachalar hosil qilishi mumkin), shuning uchun tanlangan ultrasonik o'lchagich buni ko'tara olishini tekshirish kerak (ko'p hollarda to'g'ri tanlangan chastota bilan tranzit-vaqtli yechim).

Vorteks oqim o'lchagichlar

Vorteks oqim o'lchagich vorteks ajralishi hodisasidan foydalanadi. Suyuqlik to'siqli (bluff body, aerodinamik silliqanmagan) elementdan oqib o'tganda, uning ortida navbatma-navbat vortekslar hosil bo'ladi, bu bayroq ustunidan ajraladigan vortekslar sababli bayroqning hilpirashiga o'xshaydi. Vorteks ajralish chastotasi keng diapazonda oqim tezligiga proporsional bo'ladi va quyidagicha ifodalanadi:

$$f = St \cdot \frac{v}{d} \quad \text{where } St \text{ (Strouhal number)}$$

o'lchamsiz doimiy bo'lib, u to'siq shakliga bog'liq, **d** - to'siqning xarakterli eni, **v** esa tezlik. Vorteks oqim o'lchagichda quvur kesimi bo'ylab to'siq sterjeni o'rnatiladi va datchik (ko'pincha pyezoelektrik yoki sig'imli) vortekslar hosil qiladigan bosim tebranishlari yoki impulslerini aniqlaydi. Har bir vorteks ajralishi bitta impuls ga mos keladi, shuning uchun datchik o'qigan chastota oqim sarfini beradi. Vorteks o'lchagichlarda harakatlanuvchi qismlar yo'q (to'siq elementi statsionar va mustahkam), shuning uchun ular DP o'lchagichlarning ayrim afzalliklarini (mustahkamlik, harakatlanuvchi mexanizm yo'qligi) turbina kabi nisbatan keng diapazon va raqamli impuls chiqishi bilan birlashtiradi. Ular ko'p turdagi muhitlar

uchun mos: bug', gaz va suyuqlik oqimlarida keng qo'llaniladi. Quyosh stansiyasida vorteks o'lchagich turbina kirishidagi **bug' oqimini** o'lchashi mumkin, chunki vorteks o'lchagichlar bug'ning yuqori haroratlariga ($300+^{\circ}\text{C}$) va yuqori bosimlarga chidamli, hamda aniqlikni (odatda $\pm 1\%$ atrofida) saqlaydi. Ular bu xizmatda turbinalar kabi tez eskirmaydi. **HTF suyuqlik oqimi** uchun ham vorteks o'lchagichlar ishlatilishi mumkin; masalan, konturdagi sintetik moy oqim sarfini o'lchashda vorteks o'lchagich oqimga proporsional impulslar hosil qiladi. Ular ma'lum darajada o'zgaruvchanlikka chidamli bo'ladi (turbinalarga nisbatan viskozitetga uncha sezgir emas, ma'lum chegaralarda). Ular ma'lum bosim tushuvini hosil qiladi, lekin diafragma nisbatan ancha past (to'siq elementi kesimning $\sim 10\%$ ini yopishi mumkin). Biroq vorteks o'lchagichlar barqaror vorteks hosil qilish uchun minimal oqim talab qiladi (Reynolds soni bo'yicha). Ma'lum kesish qiymatidan pastda (ko'pincha $Re \sim 5,000$ atrofida) ajralish notekis bo'lib qolishi yoki to'xtashi mumkin, shuning uchun juda past oqimlarni yaxshi o'lchay olmaydi. Ular **vibratsiyaga** ham sezgir bo'lishi mumkin, agar quvur vorteks chastotasida tebransa, datchik buni noto'g'ri signal sifatida qabul qilishi mumkin. Shuningdek, oqim pulsatsiyali bo'lsa, barqaror ajralish naqshiga xalaqit berishi mumkin. Yana bir jihat: past oqimda juda qovushqoq suyuqliklar uchun vorteks ishlamasligi mumkin (oqim to'siq atrofida laminar bo'lib qolishi mumkin). Biroq quyosh qo'llanmalarida (moy yoki suv yoki bug') oqimlar odatda yetarlicha turbulent bo'ladi. Vorteks o'lchagichlar ko'pincha diafragma kabi upstream to'g'ri quvur talab qiladi (vortekslar bir xil ajralishi uchun oqim kirishda bir tekis bo'lishi kerak). Odatda upstream $30D$, downstream $5D$ tavsiya qilinadi, ayniqsa upstream tomonda klapan bo'lsa va h.k., lekin ayrim yangi dizaynlarda oqim tekislagichlar (flow conditioners) ichiga integratsiya qilingan bo'ladi. Vorteks o'lchagichlarda turndown o'rtacha bo'ladi (taxminan $10:1$, yaxshi aniqlikda). Ular chastota chiqishini beradi, shuning uchun ko'pincha ichki raqamli transmitterga ega bo'lib, $4-20\text{ mA}$ yoki impuls chiqishga aylantiradi. Xizmat ko'rsatish bo'yicha ular nisbatan qulay, harakatlanuvchi qism yo'q, lekin datchik va to'siq element agressiv muhitda yoki qattiq zarrachalar bo'lsa degradatsiyaga uchrashi mumkin (to'siq ustiga qattiq cho'kma yopishsa Strouhal soni biroz o'zgarishi mumkin, odatda kichik ta'sir).

Quyosh issiqlik konturlari va HVAC uchun mosligi

Bu konturlarda ko'pincha $4-8\text{ dyuym}$ yoki undan katta quvurlar bo'ladi va ular issiqlik uzatuvchi suyuqlikni tashiydi. Tarixan bunday sanoat konturlarida diafragma plastinalari yoki Venturi lar ishlatiladi. Biroq Venturi lar katta o'lchamlar uchun hajmli va qimmat, diafragmalar esa energiyani yo'qotadi, lekin sodda. Agar aniqlik eng muhim bo'lsa, Venturi o'rnatilishi mumkin (ayniqsa sinov obyektlarida). Bug'

ishlab chiqarish tomonida vorteks o'lchagichlar ko'proq qo'llanila boshlagan. Agar HTF juda issiq moy bo'lsa, vorteks mos harorat baholangan dizayn bilan ishlatilishi mumkin (va elektronika masofaviy o'rnatilgan bo'lishi mumkin). Turbinalar kichik konturlarda ishlatilishi mumkin (masalan, sinovdagi 2 dyuymli liniyada), lekin to'liq stansiya miqyosida turbinalarga texnik xizmat ko'rsatish muammo bo'lishi mumkin.

Ultrasonik qisqichli o'lchagichlar katta quvurlar uchun jozibali, chunki ularni quvurni kesmasdan o'rnatish mumkin, masalan, stansiya shubhali bo'lgan eski diafragma o'lchagich ishlashini tekshirish uchun qisqichli ultrasonik o'lchagichlarni retrofit tarzida o'rnatishi mumkin, yoki quvurga o'zgartirish kiritmasdan tadqiqot uchun qo'shimcha o'lchash nuqtalarini olish uchun qo'llashi mumkin.

Quyosh elektr stansiyalarida yoki quyosh HVAC bo'lgan binolarda chillerlarda sovituvchi suyuqlik oqim sarfini yoki isitish coil laridagi issiq suv oqim sarfini o'lchash zarur. HVAC da **kiritiladigan turbinali o'lchagichlar** yoki **vorteks o'lchagichlar** keng tarqalgan (masalan, binoning sovitilgan suv ta'minot liniyasida vorteks o'lchagich). HVAC oqimlari o'rtacha haroratda bo'ladi (masalan, 60 °C gacha), shuning uchun tanlovlar ko'p; elektromagnit oqim o'lchagichlar (bu yerda batafsil yoritilmagan, lekin suv o'tkazuvchan bo'lsa mag o'lchagichlar juda yaxshi) HVAC suv oqim sarfini o'lchashda ko'pincha ustun bo'ladi. Biroq o'tkazuvchan bo'lmagan suyuqliklar bo'lsa yoki mag o'lchagich mavjud bo'lmasa, vorteks yoki ultrasonik ishlatilishi mumkin.

DP o'lchagich (diafragma): mustahkam, ma'lum texnologiya, lekin bosim yo'qotishi va diapazon qamrovi pastroq; Turbina: yuqori aniqlik, lekin harakatlanuvchi qismlar bor va toza suyuqlik talab qiladi; Ultrasonik: invaziv emas, o'rnatish moslashuvchan, lekin boshlang'ich narxi nisbatan yuqori va to'g'ri sozlash talab qiladi; Vorteks: mustahkam, ko'p turdagi muhitlar (jumladan bug'/gaz) bilan ishlaydi, narxi o'rtacha, lekin ishlashi uchun yetarli oqim kerak va shovqinga sezgir bo'lishi mumkin.

5.2 Quvurlarda oqim sarfini o'lchash (Oqim profillari, Reynolds soni, datchik joylashuvi)

Quvurdagi oqim sarfini o'lchash natijalari quvur ichidagi oqim profili bilan kuchli darajada belgilanadi, ya'ni oqimning laminar yoki turbulent bo'lishiga, hamda tezlikning quvurning ko'ndalang kesimi bo'ylab qanday taqsimlanishiga qarab. Ushbu ta'sirlarni tushunish datchikni to'g'ri tanlash va joylashtirish uchun muhim.

To'liq shakllangan laminar oqimda ($Re < \sim 2300$) quvurdagi tezlik profili parabolik bo'ladi: markazdagi suyuqlik eng tez harakatlanadi (maksimal tezlik = ko'ndalang kesim bo'yicha o'rtacha tezlikning $2\times$), devorlarda esa nolga tushadi (sirpanmaslik

sharti). Turbulent oqimda (Re 4000 dan ancha yuqori bo'lganda va amaliy katta masshtabdagi oqimlarning aksariyati turbulent bo'lganda) profil markaziy qismda nisbatan “tekis” bo'ladi va devorlar yaqinida yupqa chegara qatlamida pasayadi. Silliqliq quvurlardagi turbulent oqimda, $Re \sim 100\ 000$ va undan yuqori bo'lganda, markaz chizig'i tezligi o'rtacha tezlikdan atigi $\sim 10-15\%$ yuqori bo'lishi mumkin. Nega bu muhim? Ko'plab oqim o'lchagichlar ma'lum bir profilni faraz qiladi yoki shunga kalibrlangan bo'ladi. Masalan, oqim turbulent bo'lganda orifisning discharge ko'effitsienti nisbatan doimiy bo'ladi (chunki oqim jeti shakli va shuning uchun bosim tushuvi barqaror). Biroq laminar rejimda orifisning xatti-harakati Reynolds soni bilan sezilarli o'zgaradi, shu sababli laminar oqimda orifisdan foydalanish, agar tuzatishlar kiritilmasa yoki Reynolds soni o'lchanmasa, katta xatoliklarga olib kelishi mumkin. Xuddi shuningdek, bitta nuqtadagi tezlik o'lchovi (masalan, Pitot trubkasi yoki quvurga kiritiladigan termik oqim datchigi) umumiy oqim sarfini aniqlash uchun profilni bilishi kerak. Laminar oqimda markaziy tezlikni o'lchab, turbulentdagi tekis profilni faraz qilish oqim sarfini keskin past baholaydi (chunki laminar rejimda taqsimot ancha notekis bo'ladi).

Reynolds soni

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

oqimning laminar yoki turbulent (yoki ularning orasidagi o'tish) ekanini miqdoriy ifodalaydi. Oqim o'lchagichlarning kalibrlash egri chiziqlari ko'pincha qo'llaniladigan Reynolds soni diapazonini ko'rsatadi. Masalan, vorteks oqim o'lchagichda Strouhal soni ma'lum Reynolds sonidan yuqorida (odatda $\sim 5k$ yoki $10k$) nisbatan doimiy bo'ladi, lekin past Reynolds sonlarda u siljishi mumkin; shu sababli o'lchagich past oqimlarda belgilangan aniqlikka ega bo'lmasligi mumkin. Diafragma plastinalari ham shunday: juda past Reynolds sonlarda discharge ko'effitsienti pasayadi, shu sababli laminar rejimdagi juda kichik oqimni orifis bilan o'lchashga urinsangiz, standart ko'effitsientni faraz qilganda ancha noto'g'ri ko'rsatadi. Ishlab chiqaruvchilar ba'zan past Reynolds son rejimida discharge ko'effitsientini tuzatish uchun tenglamalar yoki egri chiziqlar beradi. Yana bir misol: elektromagnit oqim o'lchagichlar (avval batafsil ko'rib chiqilmagan, lekin suyuqliklar uchun keng qo'llaniladi) birinchi yaqinlashuvda tezlik profilidan mustaqil ravishda volumetrik oqim sarfini o'lchaydi (ular quvur kesimi bo'ylab integratsiya qiladi), lekin ekstremal oqimlar (masalan, assimetriyali laminar oqim) baribir og'ish kiritishi mumkin.

Bashorat qilinadigan oqim profilini ta'minlash uchun, **oqim o'lchagichlarni yuqori oqim va quyi oqim** tomonda yetarli to'g'ri quvur uchastkasi bilan o'rnatish standart amaliyot hisoblanadi. Yuqori oqim tomondagi buzilishlar, masalan tirsaklar,

nasoslar, klapanlar profilni buzishi (aylanma oqim yoki assimetriya hosil qilishi) mumkin. Masalan, bir tekislikda bo'lmagan ikki tirsak o'lchagichga kirishda aylanishli oqim hosil qilishi mumkin, bu vorteks o'lchagichda assimetrik ajralishga olib keladi yoki orifisda jetni siljitishi mumkin. Standartlar ko'pincha orifisdan oldin yuqori oqim tomonda 10-20 ta diametr uzunlikda to'g'ri quvur uchastkasini, va orifisdan keyin quyi oqim tomonda 5 ta diametr uzunlikda buzilishlarsiz uchastkani talab qiladi. Venturi trubkalari sekin tezlanish sababli biroz “kechirimli”, ammo baribir yuqori oqim tomonda ~ 5 ta diametr tavsiya etiladi. Ultrasonik oqim o'lchagichlar (tranzit-vaqtli) ham aylanishdan ta'sirlanishi mumkin, chunki tranzit vaqt yo'llari aylanish yo'q deb faraz qiladi. Ular ko'pincha oqimni tekislashni talab qiladi (ba'zi qisqichli yechimlar aylanishni o'rtachalash uchun reflection mode rejimini tavsiya qiladi). Ba'zi ultrasonik o'lchagichlarda ichki flow conditioner bo'ladi yoki joy cheklangan bo'lsa yuqori oqim tomonga uyacha (honeycomb) tekislagichlarni o'rnatish mumkin. Quvurga kiritiladigan datchiklar uchun (masalan, quvur ichida bitta nuqtada o'lchaydigan termik anemometr yoki Pitot trubkasi) joylashuv juda muhim: datchikni o'rtacha tezlikka yaqin nuqtaga kiritish kerak bo'lishi mumkin. To'liq shakllangan turbulent oqimda, **devordan 0.2 va 0.8 diametr** masofadagi nuqtalar ko'pincha o'rtacha tezlikka yaqin qiymat beradi (ma'lum “logarifmik profil” mavjud, lekin ko'pincha empirik yondashuv qo'llaniladi). Ba'zi quvurga kiritiladigan datchiklarda bir nechta sezish nuqtalari bo'ladi yoki travers qilib integratsiya qilish usuli mavjud bo'ladi.

Laminar va turbulent oqim bo'yicha mulohazalar

Quyosh isitish tizimlarida ko'plab oqimlar turbulent bo'ladi, chunki nasoslar shunga mos tanlanadi (turbulent oqim issiqlik almashinuvini kuchaytiradi). Biroq past oqim holatlarida oqim laminar bo'lishi mumkin, masalan, past oqimli tajriba qurilmasidagi kichik diametrli quvurlar yoki erta tongdagi minimal sirkulyatsiya. Agar oqim datchigi turbulent diapazon uchun kalibrlangan bo'lsa, laminar rejimdagi ko'rsatmalar noto'g'ri bo'lishi mumkin. Hisob-kitob yoki ishlash o'lchovlari uchun o'lchagich o'z mo'ljallangan Reynolds soni diapazonida ishlayotganini ta'minlaydi yoki Reynolds son bo'yicha tuzatish kiritadi. Agar laminar oqimlarni albatta o'lchash kerak bo'lsa, **hajmiy usullar** (musbat siljishli o'lchagichlar yoki parvoz-vaqti asosidagi kichik hajm o'lchovlari) yaxshiroq bo'lishi mumkin, yoki laminar oqim elementi ishlatiladi (u aslida laminar oqimni majburlovchi va laminar rejimdagi differensial bosimdan foydalanadigan oqim qurilmasi bo'lib, barqaror va $Q \sim \Delta P \cdot (1/\mu)$ formulaga ko'ra).

Harorat va zichlik

Quyosh issiqlik konturlarida suyuqlik zichligi harorat bilan o'zgarishi mumkin (moy sovuqdan issiqqa o'tganda $\sim 10\%$ kengayadi). Massa oqimini aniqlaydigan oqim o'lchagichlar (masalan, Coriolis yoki termik o'lchagichlar) buni bevosita hisobga oladi, biroq volumetrik oqimni o'lchaydigan orifis kabi yechim zichlik o'zgarsa ΔP dagi o'zgarishni haqiqatan ham ko'radi (chunki bir xil v uchun $\Delta P \sim (\rho v^2)/2$). Agar massa oqimi doimiy bo'lib, suyuqlik qizib zichligi kamayca, volumetrik oqim ortadi va orifis buni ΔP ning oshishi orqali to'g'ri aks ettiradi (chunki v ortadi). Biroq, agar maqsad massa oqimini o'lchash bo'lsa, zichlik bo'yicha tuzatish kiritilishi mumkin, masalan, suyuqlik haroratini ham o'lchab zichlikni hisoblash va so'ng **massa oqimi = hajmiy oqim * zichlik** deb hisoblash. Bug' oqimida ham zichlik bosim bilan o'zgaradi, shuning uchun bug' uchun differensial bosim o'lchagich massa oqimini hisoblashda bosim/harorat kompensatsiyasini o'z ichiga olishi kerak.

Datchikni o'rnatish yo'nalishi

Yana bir amaliy jihat - o'rnatish yo'nalishi va ikki fazali oqim yoki pufakchalardan qochishdir. Masalan, gorizontal liniyadagi orifis o'lchagich suyuqlikni yaxshi o'lchaydi, lekin gaz pufakchalari bo'lsa, ular tebranishlar yoki og'ish keltirib chiqaradi (pufakcha o'tganda zichlik lokal kamayadi va ΔP o'qishini buzadi). Quvurlash bo'yicha yaxshi amaliyot oqim o'lchagichlar bir fazali oqimni ko'rishi uchun havo chiqarish klapanlarini kiritishi mumkin. Bug' oqimida ko'pincha kondensat hosil bo'ladi, shuning uchun DP transmitterining impuls liniyalari barqaror ko'rsatmalar uchun ikkala yo'nalishda ham suv (kondensat) bilan to'ldiriladi, "wet leg" sxemasidan foydalaniladi. Datchik joylashuvi texnik xizmat uchun kirish imkoniyati ni ham hisobga olishi kerak (masalan, vorteks o'lchagichni chiqarib olish yoki orifisni tozalash mumkinmi yoki yo'q). Quyosh stansiyalarida takrorlovchi zaxira ba'zan qo'llaniladi: muhim o'lchovlar uchun parallel ulangan ikkita oqim datchigi ishlatiladi (ammo odatda narx sababli bittasi qo'yiladi)

Misol - Quyosh konturidagi oqim sarfi

Parabolik tarnovli (novli) konturni ko'rib chiqamiz: moy sarfini o'lchash uchun har bir konturning ta'minlash liniyasiga **Venturi trubkasini** o'rnatishlari mumkin. Oqim bo'yicha yuqorida (kirish qismida), asosiy kollektordan chiqishda to'g'ri quvur qismi bo'lishini ta'minlaydilar, lekin joy yetarli bo'lmasa, oqimni to'g'rilovchi parraklar (yo'naltirgichlar) o'rnatishlari mumkin. Venturi trubkasidagi bosimlar farqi (ΔP) differensial bosim (DP) datchigi yordamida o'lchanadi; u turbulent oqim uchun ($Re \sim 1e5$) kalibrlangan bo'ladi. Juda past sarfda (sekin ishga tushirish jarayonida) bu ΔP qiymati juda kichik bo'ladi va o'lchash unchalik aniq bo'lmaydi, lekin bu

vaqtda uning o'ta aniq bo'lishi muhim emas. Ishchi sarfga erishilganda esa, u texnik talablarga to'la mos keladi. Impuls liniyalarida moy sovib qolishining oldini olish uchun, kerak bo'lganda tegishli isitish (trassirovka) tizimi bilan birga, bosim olish nuqtalarini (shtutserlarni) quvurning yon yoki pastki qismiga o'rnatadilar. Datchikning o'zi harorat kompensatsiyasiga ega bo'lishi mumkin, yoki haqiqiy massa sarfini aniqlash uchun boshqaruv tizimi o'lchangan haroratga asoslanib moy zichligiga tuzatish (korreksiya) kiritadi (chunki, pirovardida, *issiqlik energiyasi uzatilishi* = *massa sarfi* * *Cp* * ΔT).

5.3 Amaliy oqim sarfi sinovlari va ishlab chiqarish tekshiruvlari

Ishlab chiqarish muhandislari ko'pincha oqim sarfi datchiklari to'g'ri o'qiyotganiga ishonch hosil qilish uchun ularni **sinab ko'rishlari va tekshirishlari**, ba'zan esa (diagnostika yoki ishga tushirish uchun) doimiy o'lchagichsiz ham oqim sarfini o'lchashlari kerak bo'ladi. Quyida ba'zi amaliyotlar va e'tiborga olinishi kerak bo'lgan jihatlar keltirilgan..

Tekshirish usullari::

- *Taqqoslash usuli*: Agar sarf o'lchagich shubha tug'dirsa, oddiy usullardan biri uni **ikkilamchi standart oqim sarfi qurilmasi bilan taqqoslashdir**. Suyuqliklar uchun keng tarqalgan usul **chelak va soniya o'lchagich** (yoki idish va taymer) usuli hisoblanadi: oqimni ma'lum vaqt davomida kalibrlangan idishga yoki bochkaga burib yuborish va hajmni o'lchab, oqim sarfini hisoblash. Quyosh issiqlik stansiyasida bu kichik yordamchi oqimlar (masalan, issiqlik almashinuvchi sovutgich konturi) uchun amalga oshirilishi mumkin, lekin asosiy HTF (issiqlik tashuvchi suyuqlik) uchun emas (hajmlar juda katta va qaynoq). Ammo HVAC konturlarida, idishni to'ldirish orqali nasoslarda hajmiy tekshirish sinovidan foydalanishingiz mumkin. Boshqa taqqoslash usuli xuddi shu liniyada **portativ qisqichli ultratovushli** o'lchagichdan foydalanish bo'lib, bu o'rnatilgan o'lchagich bilan taqqoslash uchun mustaqil ko'rsatkich beradi. Masalan, agar doimiy diafragma 100 m³/soat ko'rsatsa va qisqichli ultratovushli o'lchagich ham ~100 (to'g'ri kalibrlangandan so'ng) ko'rsatsa, bu diafragmaning ishlashini tasdiqlaydi. Agar ular 10% ga farq qilsa, bittasi noto'g'ri, ehtimol diafragma shikastlangan yoki uzatkich noli siljigan bo'lishi mumkin va hokazo.
- *Nasos egriliklari*: Ba'zan oqim sarfini nasos xarakteristikalaridan aniqlash mumkin: masalan, nasosning differensial bosimini o'lchash va oqim sarfini chamalash uchun uning napor va oqim sarfi egriligiga qarash. Bu unchalik

izchillik emas (nasos egriliklarida ruxsat etilgan chetlanishlar bo'ladi va eskirish ularni o'zgartiradi), lekin taxminiy qiymatni berishi mumkin. Ishga tushirish jarayonida ular buni haqiqiy o'lchagichlarni aniq sozlashdan oldin oqim sarflari to'g'ri rejimda ekanligini ko'rish uchun qilishlari mumkin.

- *Trasser yoki bo'yoqni suyultirish sinovlari*: Ba'zi hollarda, ayniqsa sovutish suvi kabi yirik tizimlarda **trasser sinovini** o'tkazish mumkin, ya'ni ma'lum miqdordagi trasserni (tuz, bo'yoq yoki issiqlik) kiritish va oqim sarfini hisoblash uchun oqim bo'ylab pastda uning konsentratsiyasi yoki harorati qanday o'zgarishini ko'rish (bu ko'proq tajribaviy xarakterga ega, lekin o'lchagichlar o'rnatilmagan joylarda ishlatilgan).
- Oqim sarfi yo'qligini tekshirish: Agar oqim sarfini to'xtatish imkoni bo'lsa, ba'zi o'lchagichlarning nollarini tekshirish mumkin (masalan, uyurmali oqim to'xtaydi, chiqish nollanishi kerak). Agar u nollanmasa, bu shovqin yoki siljish xatosi bo'lishi mumkin.

Ishlab chiqarish sharoitida kalibrlash

Ba'zi sarf o'lchagichlarni o'z joyida **tekshiruvchilar** yordamida kalibrlash mumkin (odatda yoqilg'ilarni tijoriy hisobga olish uchun, masalan, quvurli tekshirish konturlari). Quyosh issiqlik stansiyasida bu odatiy hol emas, lekin masalan, muhim o'lchovlar uchun zarur bo'lsa, suv hisoblagichi ob'ektda kichik hajmli tekshiruvchi tomonidan tekshirilishi mumkin. Ko'pincha sarf o'lchagichlar yechib olinib, oqim stendi bo'lgan kalibrlash laboratoriyasiga yuboriladi (masalan, turbinali o'lchagich taroziga yoki etalon o'lchagichga nisbatan oqim laboratoriyasida har yili qayta kalibrlanishi mumkin).

Xavfsizlik qoidalari

Oqim sarfi sinovi ko'pincha katta hajmlar va potentsial issiq suyuqliklar bilan ishlashni talab qiladi. Chelak sinovi yoki pito trubkasini o'rnatish kabi ishlarni bajarishdan oldin izolyatsiya va bosimni hisobga olish kerak. **Issiq HTF konturlari** uchun tizimni ochish xavfli bo'lib, ular o'rnatilgan o'lchagichlar yoki qisqichli qurilmalar yordamida nazorat qilinadi; 400 °C moy bilan chelak sinovini o'tkazmaysiz! Lekin siz buni tomida joylashgan quyosh isitish tizimidagi iliq suv bilan qilishingiz mumkin. Shunda ham, kuyish xavfini oldini olish uchun ishlarni muvofiqlashtiring. Balandlikdagi quvurlarda Qisqichli ultratovushli datchiklardan foydalanganda, xavfsiz ish maydonchasini ta'minlang (issiqlik suyuqliklari oqadigan baland quvurlarda ishlayotgan texniklar himoyaga muhtoj). Agar diafragmali teshik tekshirilayotgan bo'lsa, impuls liniyalarining tiqilib qolmaganligini tekshirish shart,

ko'pincha differensial oqim xatolari bir tomon quruq bo'lishi kerak bo'lgan holatda tiqilib qolishi yoki nam bo'lishidan kelib chiqadi va hokazo. Bunday texnik xizmat ko'rsatish bosimsiz sharoitlarda tegishli shaxsiy himoya vositalari bilan amalga oshiriladi.

- Havo o'tkazgichlardagi havo oqimi uchun (quyosh HVAC tizimi), ba'zan **Pitot trubkasi bilan kesim bo'ylab travers o'lchovi** bajariladi: teshiklar ochiladi va tezlik profilini o'lchash uchun (nuqtalar to'plami kabi) havo o'tkazgich ko'ndalang kesimi bo'ylab pito trubkasi harakatlantiriladi va oqim sarfini olish uchun integrallanadi. Bu ehtiyotkorlik bilan bajarilishi kerak (havo o'tkazgich ichida o'tkir zond, ventilyatorning xavfsiz ishlashiga ishonch hosil qilish, agar havo o'tkazgichlar shovqinli bo'lsa, quloq himoya vositalarini taqish va hokazo).

Nosozliklarni bartaraf etish misollari

Agar sarf o'lchagich ko'rsatkichi noto'g'ri ko'rinsa, dala tekshiruvlari quyidagilarni o'z ichiga oladi: klapanlarning to'liq ochiqligiga ishonch hosil qilish (ba'zan qisman yopilgan klapan katta bosimlar farqini keltirib chiqarishi va qo'lda hisoblashdagi taxminlarni chalg'itishi mumkin), differensial bosim uzatkichlarining nolini tekshirish (nol siljishini ko'rish uchun izolyatsiya klapanlarini yopish), har qanday filtrlarni tozalash (oqim bo'ylab yuqorida tiqilib qolgan filtr oqim profilini o'zgartirishi yoki o'lchagichga ta'sir qiluvchi kavitatsiyani keltirib chiqarishi mumkin).

- Bir holatda, quyosh stansiyasida kutilganidan pastroq issiqlik uzatilishi kuzatildi, oqim muammolaridan shubhalanib, ular uyurmali sarf o'lchagichning to'siq tanasida xususiyati buzilgan moy tufayli ifloslanish borligini aniqladilar. Uni tozalash tegishli uyurma chastotasini tikladi.
- Boshqa misol: agar quvur yuzasi zanglagan bo'lsa yoki yetarli darajada biriktiruvchi gel bo'lmasa, Qisqichli ultratovushli datchik uzluksiz xato ko'rsatishi mumkin. Gelni qayta surtish va quvurdagi silliq joyni zımpara bilan tozalash signalni tuzatishi mumkin..

Obyektning o'zida o'lchagich diagnostikasi:

Zamonaviy aqlli sarf o'lchagichlar ko'pincha diagnostikaga ega, masalan, uyurmali o'lchagich uning datchigi (uyurmalar tomonidan emas) doimiy ravishda tebranayotganligini aniqlashi va ehtimoliy tebranish shovqini yoki to'siqdagi qatlam haqida signal berishi mumkin. Ultratovushli o'lchagichlar ko'pincha signal kuchaytirilishini o'lchaydi, agar kuchaytirish juda yuqori bo'lsa, ehtimol suyuqlik

havo bilan to'yingan yoki o'tkazgichlar yaxshi ulanmagan bo'lishi mumkin, shuning uchun bu diagnostika sizga tekshirishni buyuradi. Ushbu diagnostikalardan foydalanish tekshirish uchun uni butunlay yechib olishning oldini olishga yordam beradi.

Muhim oqimlar uchun Zaxiralangan tizim

Juda muhim oqimlarda (reaktorni sovutish oqimlari kabi va hokazo, odatiy quyosh stansiyalarida unchalik emas), ketma-ket yoki parallel o'rnatilgan bir nechta sarf o'lchagichlar tasdiqlash imkonini beradi. Quyosh issiqlik tizimida turbinaga boradigan asosiy HTF oqimi ham differensial bosimli Venturi, ham magnit sarf o'lchagich tomonidan o'lchanishi mumkin, ular bir-birini o'zaro tekshirishi mumkin. Agar biri chetga chiqsa, operatorlar kalibrlash uchun belgi oladilar.

Quyosh **issiqlik konturlari**, yuqori haroratli, bir fazali suyuqlik uchun: differensial bosim o'lchagichlar (Venturi/diafragma) yoki ultratovushli yoki ehtimol Koriolis (agar kichik liniyalar bo'lsa, garchi yirik o'lchamdagi Koriolis qimmat bo'lsa-da) keng tarqalgan. **Bug' uchun** uyurmali, diafragmali yoki o'rtacha qiymatli pito (Annubar) odatiy hisoblanadi. Eritilgan **tuzli quyosh fermalari** uchun ultratovushli qurilmalar sinovdan o'tgan, chunki eritilgan tuz uchun quvurga kiritilmaydigan qurilma qulay (oqish yo'llari yo'q) yoki maxsus materiallardan tayyorlangan diafragmalar ishlatiladi. **PV panelni tozalash suvi** yoki **HVAC oqimlari uchun** ko'pincha magnitli yoki qisqichli ultratovushli datchiklar ishlatiladi, lekin tizim kichik va toza bo'lsa turbinali ishlatiladi. Har doim texnik xizmat ko'rsatishni tahlil qiling: masalan, sizda elektr quvvati va signal simlari mavjudmi? Agar siz uni ko'z bilan ko'rib chiqa olsangiz, oddiy sovutgich konturi uchun mexanik o'lchagich (o'zgaruvchan yuzali rotametr kabi) yetarli bo'lishi mumkin.

Amalda oqim sarfini o'lchash nafaqat datchikni tanlashni, balki oqim sharoitlarining to'g'riligini (to'liq shakllangan oqim, tegishli Reynolds soni), o'rnatishning to'g'riligini (to'g'ri quvur qismlari, to'g'ri yo'naltirish) va kalibrlash yoki dala tekshiruvlari orqali ishlashini tekshirishni ham talab qiladi. Shunday qilish aniq oqim ma'lumotlarini ta'minlaydi, bu quyosh energiyasi ilovalarida ishonchli energiya balansi hisob-kitoblarini (chunki energiya = massa sarfi * entalpiya farqi) va to'g'ri boshqaruvni (toshib ketishning oldini olish uchun issiqlik idishini to'ldirishda eritilgan tuz oqimini aniq bilish, yoki haroratni saqlash uchun quyosh sovutish tizimidagi havo oqimini bilish kabi) anglatadi.

Savol Javoblar - Oqim sarfini o'lchash:

1. *Quyosh issiqlik moyi konturida diafragmali sarf o'lchagich ishlatiladi. Agar moyning oqim sarfi laminar rejimga tushib qolsa, diafragma aniqligiga nima bo'ladi?*

Javob: Diafragma aniqligi sezilarli darajada pasayadi. Laminar oqimda, ΔP va oqim sarfi o'rtasidagi bog'liqlik doimiy sarf koeffitsiyentiga ega bo'lgan standart kvadrat ildiz formulasiga mos kelmay qoladi; sarf koeffitsiyenti Reynolds soni bilan o'zgaradi. Shunday qilib, diafragma katta ehtimol bilan **oshirib** yoki **kamaytirib** ko'rsatadi (kalibrlashga qarab), chunki u turbulent sharoitlar uchun kalibrlangan. Agar tuzatishlar kiritilmasa, past Re da ko'rsatilgan oqim sarfi butunlay xato bo'lishi mumkin. Qisqacha aytganda, diafragmali o'lchagich laminar oqim sharoitlarida ishonchsiz bo'lib qoladi, chunki uning kalibrlashi o'z kuchini yo'qotadi..

2. *Nima uchun venturi va uyurmali o'lchagichlar kabi sarf o'lchagichlar oqim bo'yicha yuqorida (kirish qismida) to'g'ri quvur qismlarini talab qiladi? Agar uyurmali o'lchagich to'g'ridan-to'g'ri o'tkir burchakli tirsakdan keyin o'rnatilsa nima bo'lishi mumkin?*

Javob: Ular oqim datchigi kalibrlanganidek ishlashini ta'minlash uchun oqim bo'yicha yuqorida **to'liq shakllangan, simmetrik tezlik profiliga** muhtoj. Tirsaklar kabi to'siqlar asimmetrik tezlik taqsimotini va ba'zan uyurmalanishni (aylanma oqim) keltirib chiqaradi. Agar uyurmali o'lchagich bevosita tirsakdan keyin joylashgan bo'lsa, uyurmalar hosil bo'lishi tartibsiz bo'lishi mumkin, masalan, to'siq tanasining bir tomoniga ikkinchisiga qaraganda ko'proq oqim kelishi yoki aylanma komponent notekis uyurma hosil bo'lishiga olib kelishi mumkin. Bu **beqaror ko'rsatkichlarga** yoki tizimli xatoga olib kelishi mumkin. O'lchagich o'zgaruvchan oqim sarfi signalini yoki noaniq chastotani chiqarishi mumkin, chunki Struxal bog'liqligi bir xil keluvchi oqimni nazarda tutadi. Eng yomon holatda, agar oqim bo'linishi buzilsa, uyurmali datchik barqaror uyurmalarini umuman aniqlay olmasligi mumkin. Shuning uchun, tavsiya etilgan 10-20 diametrli to'g'ri quvur qismi bo'lmasa, o'lchagichning aniqligi va izchilligi yomonlashadi.

3. *Quyosh stansiyasining issiqlik tashuvchi suyuqlik nasosini ishga tushirish jarayonida, sizda hali sarf o'lchagich o'rnatilmagan. Oqim sarfini kutilgan diapazonda ekanligini ta'minlash uchun uni qanday qilib tezda taxminan baholashingiz mumkin?*

Javob: Nasosning **ish unumdorligi egriligidan** foydalanish mumkin. Ishlash sharoitida nasosning haydash va so'rish bosimini o'lchab (differensial naporni olish uchun), so'ngra nasosning napor va oqim sarfi egriligiga qarab, biz taxminiy oqim sarfini aniqlashimiz mumkin. Masalan, agar nasosning

differential bosimi egrilikdagi 30 m naporga to'g'ri kelsa va egrilik ushbu naporda $\sim 200 \text{ m}^3/\text{soat}$ ko'rsatsa, biz taxminan $200 \text{ m}^3/\text{soat}$ oqim o'tayotganini taxmin qilamiz. Bu taxminiy tekshiruv. Bundan tashqari, agar imkon bo'lsa, oqim sarfini to'g'ridan-to'g'ri o'lchash uchun quvurning to'g'ri qismiga vaqtinchalik **qisqichli ultratovushli sarf o'lchagich** o'rnatilishi mumkin. Agar ikkalasi ham mavjud bo'lmasa, **vaqt bo'yicha to'ldirish** sinovini o'tkazish mumkin (agar oqim bo'yicha pastda idish yoki hajm bo'lsa), masalan, oqimni qisqa vaqt davomida kalibrlangan sisternaga burish va hajm hamda vaqtni o'lchash. Ammo odatda, nasos egriligidan foydalanish taxminiy qiymat uchun eng tez usuldir. Bu o'lchagichlarni aniq sozlash yoki doimiy o'lchagichlarni o'rnatishdan oldin oqim sarfi kutilgan darajada (tartibda) ekanligini ta'minlaydi.

6. Elektr signallarini o'lchash

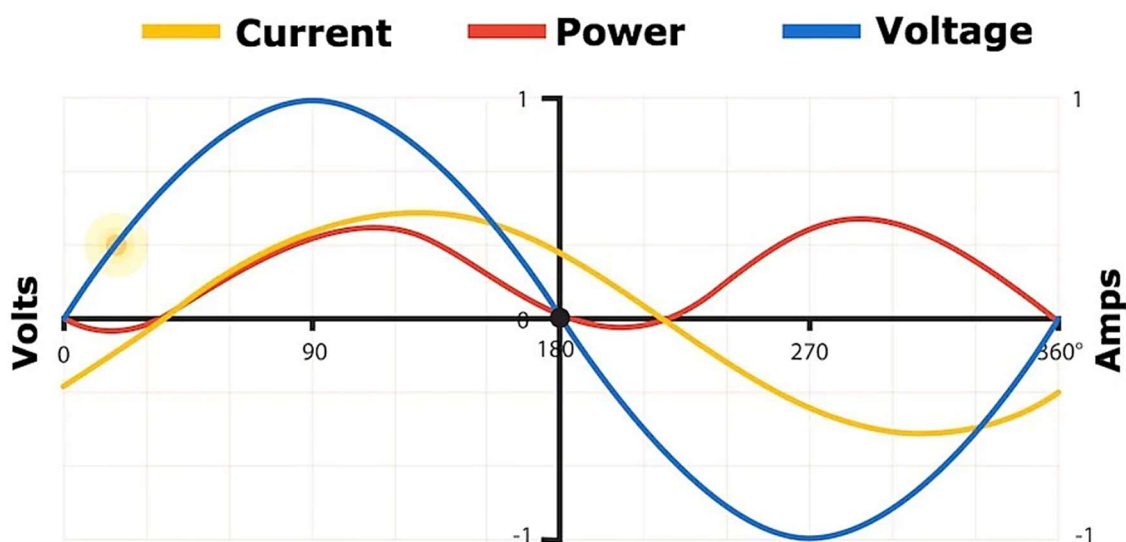
6.1 Kuchlanish, Tok kuchi, Qarshilik va Quvvatni o'lchash

Kuchlanish, tok kuchi, qarshilik va quvvat kabi elektr kattaliklarni bevosita (to'g'ridan-to'g'ri) va bilvosita usullar bilan o'lchash mumkin. **Bevosita o'lchashda** o'lchash asbobi kattalikni to'g'ridan-to'g'ri sezish uchun zanjirga ulanadi. Masalan, tok kuchini o'lchash uchun ampermetrni ketma-ket ulash yoki kuchlanishni o'lchash uchun komponentga parallel ravishda voltmetrni joylashtirish bevosita usullar hisoblanadi. Bevosita usullar odatda yuqori aniqlikni ta'minlaydi, lekin zanjirni jismoniy uzish yoki unga kirishni talab qiladi, bu xavfsizlikka tahdid solishi va ehtimol zanjir ishlashini buzishi mumkin. Bunga farqli o'laroq, **bilvosita o'lchash** kattalikni bog'liq bo'lgan parametr orqali aniqlaydi. Keng tarqalgan bilvosita usullarga ampermetrni zanjirga uzish o'rniga, kuchlanishning tushishi yoki magnit maydoni orqali tok kuchini o'lchash uchun tok shuntidan yoki Xoll effekti qisqichli datchigidan foydalanish kiradi. Bilvosita usullar zanjirni buzmaydi va xavfsizroq (ayniqsa, yuqori kuchlanishlar yoki toklar uchun), garchi ular kalibrlash koeffitsiyentlarini va izchillik bo'yicha kichik murosani talab qilishi mumkin. Amalda, muhandislar usulni kerakli aniqlik va xavfsizlikka asoslanib tanlaydilar; yuqori quvvatli PV (quyosh paneli) massivlari yoki tarmoqqa ulangan inverterlar uchun, o'lchash qurilmalarini xavfli potentsiallardan izolyatsiya qilish maqsadida ko'pincha zanjirga kiritilmaydigan tok transformatorlari va kuchlanish transformatorlari ishlatiladi.



Rasm 25: Keysight osilloskopida signalni o'lchash

Elektr o'lchovlarining asosida kuchlanish (V), tok kuchi (I) va qarshilikni (R) $V = I \cdot R$ ko'rinishida bog'lovchi **Om qonuni** yotadi. Ushbu fundamental qonun ikkita kattalikni o'lchash orqali bittasini bilvosita keltirib chiqarish imkonini beradi. Masalan, qarshilikni o'lchashning keng tarqalgan usuli – ma'lum tokni berish va natijada hosil bo'lgan kuchlanishni o'lchash (yoki aksincha), so'ngra $R = V/I$ ni hisoblash. Ko'pgina raqamli multimetrlar “ohmmetr” rejimida aynan shu tamoyildan foydalanib, noma'lum rezistorga kichik sinov tokini beradi va hosil bo'lgan kuchlanishni o'qiydi. O'zgarmas tok (DC) zanjirlarida **quvvat (P)** $P = V \cdot I$ sifatida hisoblanadi. O'zgaruvchan tok (AC) tizimlarida quvvatni o'lchash murakkabroq: u quvvat koeffitsiyenti bilan bog'langan aktiv quvvat (vattlarda) va to'la quvvatni (volt-ampperlarda) o'z ichiga oladi. **Quvvat koeffitsiyenti** elektr quvvatining qanchalik samarali foydali ishga aylantirilishini tavsiflovchi aktiv quvvatning to'la quvvatga nisbati sifatida ta'riflanadi. Birlik quvvat koeffitsiyenti (1.0) barcha olingan quvvat foydali ish bajarayotganini anglatadi, pastroq quvvat koeffitsiyenti esa kuchlanish va tok o'rtasida faza siljishini keltirib chiqaradigan reaktiv quvvat (induktivlik yoki sig'im tufayli) mavjudligini ko'rsatadi. Vattmetrlar yoki quvvat analizatorlari deb ataluvchi asboblarda kuchlanish va tok to'lqin shakllarini (osillogrammalarini) namuna olish, so'ngra haqiqiy quvvatni (ko'pincha V va I ni ko'paytirish va bir davr bo'yicha o'rtacha qiymatni hisoblash orqali) hisoblash orqali AC quvvatini o'lchaydi. Tarmoqqa ulangan quyosh invertorlarida quvvat koeffitsiyentini 1 ga yaqin ushlab turish samaradorlik va tarmoq talablari uchun muhimdir, zamonaviy invertorlar kerak bo'lganda quvvat koeffitsiyentini sozlash uchun reaktiv quvvatni boshqarish imkoniyatini ham taqdim etishi mumkin.



Rasm 26: Tok kuchi va Kuchlanish fazalari farqi

Fotovoltaik (PV) tizimlarda, panelning chiqish kuchlanishi va tok kuchi odatda ish quvvatini ($P = V \cdot I$) aniqlash uchun yuklama ostida bevosita o'lchanadi. Bilvosita

usullar ham keng tarqalgan: masalan, shunt rezistori undagi kichik kuchlanish tushishi orqali PV zanjiridagi (string) tok kuchini sezishi mumkin yoki Xoll effekti datchigi o'tkazgichga tegmasdan tokni magnit maydoni orqali o'lchash uchun kabel atrofida qisqich bilan qotirilishi mumkin. Batareya tizimlari (o'zgarmas tok quvvatini ta'minlovchi) zaryad holatini baholash uchun bevosita kuchlanish o'lchovlariga va ba'zan impedans spektroskopiyasi kabi usullar orqali bilvosita ichki qarshilik o'lchovlariga tayanadi. Quyosh inverterlarining o'zgaruvchan tok (AC) chiqishi uchun haqiqiy quvvatni ham, quvvat koeffitsiyentini ham hisoblash maqsadida kuchlanish va tok kuchini sinxronlashtirilgan namuna olish orqali o'lchash talab qilinadi. Umuman olganda, datchiklardan bevosita ko'rsatkichlar olish va hisob-kitoblar (Om qonuni va quvvat formulalaridan foydalangan holda) kombinatsiyasi individual panellarning IV (volt-amper) egriliklaridan tortib to o'zgaruvchan tok (AC) tarmog'iga uzatishgacha bo'lgan quyosh energiyasi tizimlarini to'liq elektr jihatdan xarakterlash imkonini beradi.

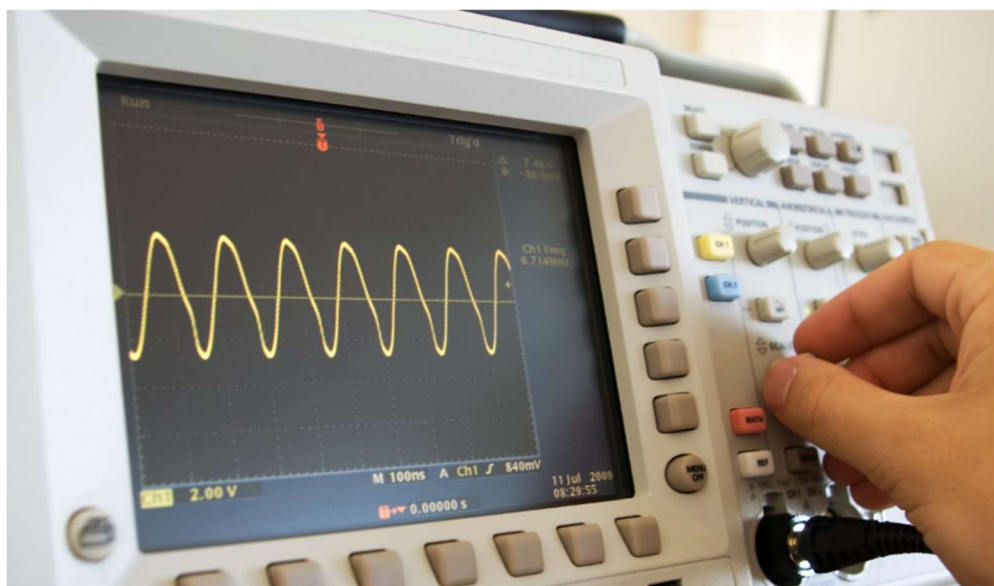
6.2 Multimetrlar, ossilloqraflar va datchiklardan foydalanish

Raqamli multimetrlar (DMM) asosiy elektr diagnostikasi uchun ko'p qirrali asboblardir. Multimetr o'zgarmas (DC) yoki o'zgaruvchan (AC) kuchlanishni, tok kuchini va qarshilikni bevosita o'lchashi mumkin, ko'pgina modellar zanjir butunligi, sig'im, chastota yoki haroratni tekshirish uchun qo'shimcha rejimlarni ham o'z ichiga oladi. Raqamli multimetrlarning ishlash tamoyili odatda kirishdagi analog qiymatni (kuchlanish yoki tok kuchini o'lchash uchun shuntidagi kuchlanish tushishini va hokazo) raqamli ko'rsatkichga aylantiradigan ichki analog-raqamli o'zgartirgichni o'z ichiga oladi. Multimetrlarni tanlashda uning o'lchash diapazoni va toifasi mos kelishiga ishonch hosil qilish kerak, masalan, PV zanjirining yuqori o'zgarmas kuchlanishini o'lchash massivning ochiq zanjir kuchlanishiga (ko'pincha 600-1000 VDC) mo'ljallangan hisoblagichni talab qiladi. Tok kuchi uchun multimetrlar ko'pincha kichikroq toklarni bevosita o'lchash uchun saqlagich bilan himoyalangan shunt kirishlariga ega bo'lib, kattaroq AC yoki DC toklarni bilvosita o'lchash uchun qisqichli zondlardan ham foydalanishi mumkin. **Kerakli asbobni tanlash** juda muhim: qo'l multimetri barqaror holatdagi o'lchovlar yoki simlar va ulanishlardagi nosozliklarni aniqlash uchun idealdir, vaqt bo'yicha o'zgaruvchan signallarni tahlil qilish uchun esa ossilloqraf talab qilinadi.



Rasm 27: Multimetr

Ossillograf kuchlanishning (va to'g'ri datchik bilan tok kuchi yoki boshqa signallarning) vaqt hududidagi vizualizatsiyasini taqdim etadi. Barqaror raqamli ko'rsatkich (AC uchun ko'pincha o'rtacha kvadratik yoki o'rtacha qiymat) beruvchi multimetrlardan farqli o'laroq, ossillograflar signal to'lqin shaklini chizib, muhandislarga o'tish jarayonlari, pulsatsiya, shovqin yoki davriy to'lqin shakllarini kuzatish imkonini beradi. Bu quvvat elektronikasi va quyosh inverterlarida, ayniqsa signallar sinus shaklida bo'lmaganda juda foydalidir. Ossillograflar chastotani, faza siljishlarini ham o'lchashi mumkin va matematik funksiyalar yordamida quvvat kabi kattaliklarni hisoblay oladi. Ossillografda tok kuchini o'lchash uchun odatda tok zondi (masalan, Xoll effektiga asoslangan qisqichli zond) yoki shunt rezistori ishlatiladi. Aslida, ossillograf ma'lum qarshilikka ega rezistordagi kuchlanishni sezish va $I = V/R$ Ohm qonunini qo'llash orqali tok kuchini **bilvosita o'lchaydi**. Yuqori chastotali yoki yuqori kuchlanishli o'lchovlar (invertni o'zgartirib ulash to'lqin shakllari kabi) maxsus zondlarni talab qiladi: **yuqori kuchlanishli differensial zond** invertorning to'liq ko'priq sxemasi chiqishini xavfsiz o'lchashi mumkin va **tok kuchi zondi** zanjirga xalaqit bermasdan tez o'zgaruvchi tok to'lqin shakllarini yozib oladi..



Rasm 28: Ossilloskop

Multimetr va ossillograf o'rtasidagi tanlov o'lchash maqsadlariga bog'liq. Masalan, batareyalar blokining kuchlanishini yoki barqaror o'zgarmas tokni (DC) tekshirish uchun multimetr tez va izchil ko'rsatkichlarni taqdim etadi. Ammo AC tarmoq sifatidagi muammoni yoki invertorning KMI (kenglik-impulsli modulyatsiya) orqali o'zgartirib ulash harakatini tashxislash uchun ossillograf multimetr o'rtacha qiymatini hisoblab tekislaydigan vaqt hududidagi tafsilotlarni ochib beradi. **Energiya tizimi diagnostikasida** ko'pincha ikkala vosita bir-birini to'ldiruvchi shaklda ishlatiladi. Masalan, invertorning chiqish kuchlanishi va chastotasi texnik talablarga mos kelishini multimetr yordamida tekshirish mumkin, so'ngra qandaydir yuqori chastotali kuchlanish sakrashlari yoki to'lqin shakli buzilishlarini ko'rish uchun ossillografdan foydalaniladi. Ossillograflar shuningdek, inverter chiqishlarida garmonik tarkibni yoki elektromagnit shovqinni aniqlash uchun foydali bo'lgan TFK (Tez Furye o'zgartirishi / FFT) funksiyalari orqali chastota hududini kuzatish imkonini beradi.

Ushbu asboblardan foydalanganda to'g'ri **zondlar va usullar** muhim ahamiyatga ega. Masalan, yuqori sinfazali kuchlanish mavjud bo'lganda (masalan, yuqori kuchlanishli zanjirda kichik shunt kuchlanishini sezish) kichik signallarni o'lchashda ham asbobni, ham foydalanuvchini himoya qilish uchun differensial zond yoki izolyatsion kuchaytirgich talab qilinadi. Ossillografning **vaqt bazasi va namuna olish sozlamalari** qiziqish uyg'otayotgan hodisalarni qayd etish uchun (uzoq muddatli tendensiyalarni yozib olish uchun sekin yoyish, yoki mikrosaniyalik o'tish jarayonlarini o'tkazish uchun tez yoyish) sozlanishi kerak. Barcha holatlarda xavfsizlik va asbob ko'rsatkichlariga rioya qilish, elektr shchitlari uchun CAT III yoki CAT IV toifali o'lchagichdan foydalanish, qisqa tutashuvlarning oldini olish uchun ossillografning yerga ulash qisqichlarini haqiqiy yerga ulangan holda saqlash

va hokazolar talab qilinadi. To'g'ri asbob va sozlangan muhitni tanlash orqali muhandislar quyosh energiyasi tizimlarining nosozliklarini multimetr bilan PV zanjirining butunligini tekshirishdan tortib to keng tarmoqli ossillograf bilan invertordagi ulash jarayonlarini tahlil qilishgacha samarali tarzda bartaraf etishlari va tasdiqlashlari mumkin..

6.3 Elektr xavfsizligi qoidalari

Quyosh sanoati tizimlarida elektr o'lchovlari bilan ishlash xavfsizlik qoidalariga qat'iy rioya qilishni talab qiladi. Yuqori kuchlanishlar (masalan, PV massivlaridan keladigan bir necha yuz voltli DC yoki tarmoqqa ulangan tizimlardan keladigan AC) elektr toki urishi va elektr yoyi xavfini tug'diradi, shuning uchun muhandislar tegishli shaxsiy himoya vositalaridan (PPE) va xavfsiz ishlash usullaridan foydalanishlari kerak. Asosiy shaxsiy himoya vositalariga izolyatsiya qilingan qo'lqoplar (tizim kuchlanishiga mo'ljallangan), himoya ko'zoynaklari, olovga chidamli kiyimlar (yuqori tushuvchi energiya darajalari uchun NFPA 70E tomonidan talab qilinadigan elektr yoyiga chidamli kostyumlar) va izolyatsiyalangan asboblardan kiradi. Har qanday o'lchov yoki texnik xizmat ko'rsatishdan oldin uskunani quvvatsizlantirish va xavfsizlantirish uchun izolyatsiya usullari qo'llanilishi kerak. Amalda, bu uzish kalitlarini ochishni, PV birlashtiruvchi qutilarini ajratishni va zanjirlar tasodifan qayta quvvatlanmasligini ta'minlash uchun Qulflash/Belgilash (LOTO - Lock-Out/Tag-Out) kabi usullardan foydalanishni anglatadi. Qulflash qurilmalari (qulflar, guruh bo'lib qulflash uchun ko'p halqali qurilmalar) va ogohlantiruvchi belgilar avtomatlarga yoki uzgichlarga o'rnatiladi, shunda ish olib borilayotganda hech kim tizimni qayta quvvatlay olmaydi. Guruh bo'lib izolyatsiya qilish uchun Qulflash-belgilash halqasi (bir nechta qulf osish imkonini beradi). LOTO tartib-qoidasi tasodifiy quvvatlanishning oldini olish uchun OSHA qoidalari tomonidan majburiy qilib qo'yilgan bo'lib, energiya manbalari ko'p (quyosh panellari, akkumulyator batareyalari va elektr tarmog'i) bo'lishi mumkin bo'lgan quyosh inshootlarida o'ta dolzarbdir. Masalan, PV invertoriga texnik xizmat ko'rsatishda nafaqat AC avtomatini ochish, balki DC panellarini yopish yoki uzish ham kerak, hatto "o'chirilgan" bo'lsa ham, PV massivi quyosh nurida quvvat ishlab chiqaradi, shuning uchun tizimni haqiqatan ham quvvatsizlantirish uchun panellarni yopish yoki PV massivini uzish kalitlaridan foydalanish zarur.

Kuchlanish ostidagi zanjirlar bilan xavfsiz ishlash ba'zan muqarrar bo'ladi (masalan, ishlayotgan inverter chiqishidagi kuchlanishni tekshirish). Bunday hollarda xodimlar qat'iy protokollarga amal qiladilar: minimal ochiq metall qismiga ega bo'lgan izolyatsiyalangan sinov zondlaridan foydalanish, tok yurak orqali o'tishining oldini olish uchun bir qo'l qoidasi tutish ("bir qo'l qoidasi") va

izolyatsion gilamchalarda turish. Izolyatsiyalangan tutqichli asboblari va ruxsat etilgan toifali sinov uskunalari ishlatilishi kerak. Katta PV fermalari yoki sanoat energiya saqlash tizimlari kabi yuqori kuchlanishli quyosh qurilmalari, shuningdek, yaqinlashish chegaralariga (elektr xavfsizligi standartlarida belgilangan chegaralangan va taqiqlangan yaqinlashish masofalari) rioya qilishni va ba'zan kuchlanish ostida ish olib borilayotganda xavfsizlik bo'yicha kuzatuvchining ishtirok etishini ham talab qiladi.

Bundan tashqari, **elektr yoyi xavfini** ham boshqarish kerak. Yuqori kuchlanishli/yuqori tokli zanjirlarda (katta PV massivining DC shinasini yoki quyosh fermasining AC tarmog'i kabi) ulash-uzish ishlarini bajarish yoki o'lchash vaqtida, agar tasodifan qisqa tutashuv yuzaga kelsa, elektr yoyi paydo bo'lishi mumkin. Xodimlar elektr yoyi xavfini baholashni o'tkazishlari hamda hisoblangan tushuvchi energiya ruxsat etilgan chegaradan yuqori bo'lsa, elektr yoyiga chidamli tegishli kiyimlar va yuzni himoya qiluvchi niqoblar kiyishlari kerak. Ko'pgina quyosh inshootlari birlashtiruvchi qutilarga va tarqatish qurilmalariga shaxsiy himoya vositalarining zarur darajalarini ko'rsatuvchi ogohlantiruvchi yorliqlar osib qo'yadi. Har qanday kuchlanish ostidagi sinovdan oldin adashgan kuchlanishlar yo'qligiga ishonch hosil qilish uchun **uskunaning yerga ulanishini** tekshirish kerak va quvvatsizlantirilgandan so'ng (ayniqsa, to'plangan energiyani xavfsiz zaryadsizlantirish uchun yuqori sig'imli tizimlarda) vaqtinchalik yerga ulash tasmalarini o'rnatish mumkin. Va nihoyat, elektr tizimlaridagi har qanday ish tizimli ravishda qulflash/belgilash ro'yxatini hamda simlarga tegishdan oldin nolinchini energiyani tasdiqlash uchun ishonchli o'lchagich yordamida kuchlanishni tekshirishni o'z ichiga olishi kerak. Ushbu xavfsizlik qoidalariga, shaxsiy himoya vositalaridan foydalanish, LOTO, quvvatsizlanganlikni tekshirish va kuchlanish ostida ishlashda ehtiyotkorlik usullariga rioya qilish orqali muhandislar yuqori kuchlanishli quyosh uskunalari ishlash xavfini sezilarli darajada kamaytirishlari va xavfsiz ish muhitini ta'minlashlari mumkin.

7. Kimyoviy va atrof-muhit datchiklari

7.1 Gaz konsentratsiyasi datchiklari, pH metrlari, o'tkazuvchanlik zondlari

Sanoat va atrof-muhit monitoringi ko'pincha gaz konsentratsiyasi, suyuqlik pH ko'rsatkichi yoki ion o'tkazuvchanligi kabi kimyoviy xususiyatlarni o'lchashni talab qiladi. Quyosh-issiqlik stansiyalarida yoki batareya tizimlarida ushbu o'lchovlar xavfsizlikni (masalan, gaz sizib chiqishini aniqlash) va jarayon sifatini (masalan, suvning kimyoviy tarkibini nazorat qilish) ta'minlashga yordam beradi. **Gaz konsentratsiyasi datchiklari** maqsadli gaz va o'lchash diapazoniga qarab turli xil bo'ladi. Keng tarqalgan turlaridan biri uglerod oksidi, vodorod sulfidi, kislorod va hokazo kabi gazlar uchun ishlatiladigan **elektrokimyoviy gaz datchigidir**. Elektrokimyoviy datchik odatda elektrod-sezgir (ishchi), qarshi elektrod va ko'pincha elektrolit ichidagi taqqoslash (etalon) elektrodidan iborat. Maqsadli gaz datchikka tarqalib, ishchi elektrodga yetib borganda, unda oksidlanish-qaytarilish (oksidlanish yoki qaytarilish) reaksiyasi sodir bo'ladi, bu gaz konsentratsiyasiga mutanosib elektr tokini hosil qiladi. Datchikning tashqi sxemasi ushbu mikro-tokni o'lchab, gazning milliondan bir ulushdagi (ppm) ko'rsatkichini taqdim etadi. Elektrokimyoviy datchiklar o'zining o'ziga xosligi va chiziqliligi bilan qadrlanadi, masalan, CO datchigi CO konsentratsiyasiga chiziqli ravishda tok hosil qilib, kalibrlashni soddalashtiradi. Ularni ma'lum konsentratsiyali etalon gazlar bilan vaqti-vaqti bilan kalibrlash, reaktiv kimyoviy moddalar vaqt o'tishi bilan sarflangani sababli oxir-oqibat almashtirish talab etiladi.

Yonuvchan gazlar (metan yoki vodorod kabi) va ba'zi zaharli gazlar uchun **katalitik datchiklar** (bonchoqsimon) yoki **infraqizil (IR) gaz detektorlaridan** foydalanish mumkin. Katalitik datchik (pellistor) gazni isitiladigan elementda yondiradi va (konsentratsiyaga mos keladigan) harorat o'zgarishini o'lchaydi, IR gaz datchiklari esa gazga xos bo'lgan o'ziga xos to'lqin uzunliklarida infraqizil nurning yutilishini o'lchaydi (CO_2 , uglevodorodlar va boshqalar uchun foydali). Har bir turning o'z kalibrlash tartibi mavjud, IR datchiklari baza/taqqoslash tekshiruvlariga muhtoj, katalitik datchiklar esa sinov gazi bilan kalibrlanishi kerak va ishlashi uchun kislorod ham talab qiladi (ular aslida namunaning bir qismini yoqish orqali yonuvchi tarkibni o'lchaydilar). Sanoat sharoitida gaz datchiklarini **kalibrlash** juda muhim: odatda ikki nuqtali kalibrlash (nol gazi va etalon gazi) amalga oshiriladi. Xavfsizlik monitorlari (CSP stansiyasining issiqlik moyi zonasidagi H_2S monitori kabi) uchun xavfsizlik standartlari tomonidan muntazam ravishda tezkor tekshiruvlar (sezgirlikni tekshirish uchun sinov gazini berib ko'rish) talab qilinadi..



Rasm 29: Katalitik bonchoqsimon datchiklar / Pellistorlar

pH metrlari eritmalarning kislotaliligi yoki ishqoriyligini o'lchash uchun ishlatiladi, masalan, quyosh issiqlik stansiyasining suvni tozalash tizimlarida yoki quyosh konsentratorining sovutgichi uchun. pH metri vodorod ionlari konsentratsiyasiga ta'sirchan bo'lgan ion-selektiv elektrod vazifasini bajaruvchi **shisha elektroddan** foydalanadi. Shisha elektrod ichki taqqoslash (etalon) elektrodiga nisbatan eritmadagi vodorod ionlari faolligiga mutanosib ravishda o'zining yupqa shisha membranasini orqali kuchlanish (potensiallar farqi) hosil qiladi (Nernst tenglamasiga ko'ra). pH metrining elektronikasi ushbu millivoltli signalni kuchaytiradi va uni pH qiymatiga aylantiradi. Kuchlanish va pH o'rtasidagi bog'liqlik haroratga bog'liq bo'lganligi sababli (25°C da har bir pH birligi uchun taxminan 59.16 mV), yaxshi pH metrlari harorat kompensatsiyasini (qo'lda yoki harorat zondi orqali) o'z ichiga oladi. pH elektrodlarini kalibrlash odatda pH qiymati ma'lum bo'lgan kamida ikkita bufer eritma yordamida amalga oshiriladi (masalan, kislotali diapazon uchun pH 7.00 va 4.00 yoki ishqoriy diapazon uchun 7.00 va 10.00). O'lchagich siljish va qiyalikni Nernst tenglamasiga (ideal holda 25°C da 59.16 mV/pH qiyalik) moslash uchun sozlaydi. Sanoat sharoitida foydalanishda pH zondlarini muntazam ravishda kalibrlash va ularga texnik xizmat ko'rsatish (shisha

membranani nam holda saqlash, kerak bo'lsa taqqoslash elektrolitini to'ldirish va hokazo) talab qilinadi, chunki siljish kuzatilishi mumkin. pH datchiklari jarayon **suvning sifatini nazorat qilishda** o'ta muhimdir, masalan, qozonga beriladigan suvda (korroziyani minimallashtirish uchun) yoki issiqlikni saqlovchi suyuqliklarda to'g'ri pH ni ushlab turish.



Rasm 30: pH metr

O'tkazuvchanlik zondlari suyuqlikning elektr tokini o'tkazish qobiliyatini o'lchaydi, bu esa erigan ion turlari konsentratsiyasi bilan bevosita bog'liq. Ular odatda suyuqlikka joylashtiriladigan ikkita (yoki to'rtta) elektrodga ega; elektrodga kichik o'zgaruvchan (AC) kuchlanish beriladi va o'tkazuvchanlikni aniqlash uchun hosil bo'lgan tok kuchi o'lchanadi. (AC elektrodlarda ionlarning qutblanishini oldini olish uchun ishlatiladi). O'tkazuvchanlik (ko'pincha $\mu\text{S}/\text{sm}$ yoki mS/sm da ifodalanadi) suvdagi jami erigan qattiq moddalar bilan bevosita bog'liq. Elektr stansiyalari kontekstida **o'tkazuvchanlik monitoringi** suvning tozaligini ta'minlash uchun zarurdir. Masalan, bug' turbinalaridan foydalanadigan jamlangan quyosh issiqlik elektr stansiyasi o'ta toza suv yetkazib berish uchun tuzsizlantirish

(demineralizatsiya) tizimiga ega bo'ladi; demineralizator qatlamlaridan oldingi va keyingi o'tkazuvchanlik datchiklari ion almashinuvchi qatronlar ifloslanishlarni olib tashlayotganini tekshiradi. Agar o'tkazuvchanlik belgilangan chegaradan oshib ketsa, bu ifloslanishlarning sizib o'tayotganini ko'rsatadi, bu esa turbina parraklari yoki issiqlik almashinuvchilarda qasmoq yig'ilishi xavfini tug'diradi. O'tkazuvchanlik zondlari ko'pincha ma'lum o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan standart KCl eritmalari yordamida kalibrlashni va yacheyka doimiysini tekshirishni talab qiladi (zondning geometriyasi ko'rsatkichlarga ta'sir qiladi). Ba'zi zondlar harorat datchiklarini o'z ichiga oladi, chunki suvning o'tkazuvchanligi harorat bilan o'zgaradi (odatda har $^{\circ}\text{C}$ uchun 2% ga oshadi).



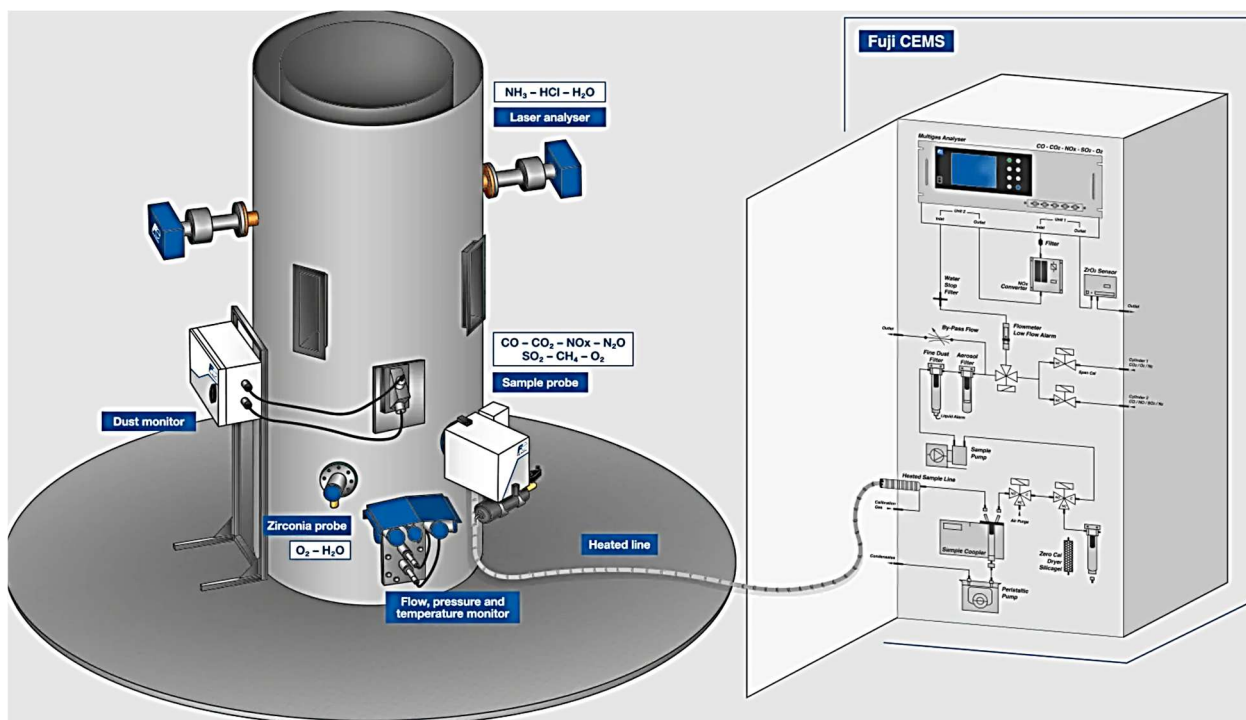
Rasm 31: O'tkazuvchanlik Zondi

Xulosa qilib aytganda, gaz datchiklari, pH va o'tkazuvchanlik zondlari har biri **o'ziga xos ishlash tamoyillariga** ega: gaz datchiklari uchun elektrokimyoviy reaksiyalar, pH uchun potentsiometrik o'lchash va o'tkazuvchanlik uchun elektr o'tkazuvchanlik tamoyillari amal qiladi, biroq ularning barchasi ehtiyotkorlik bilan kalibrlash va texnik xizmat ko'rsatishni talab qiladi. Quyosh-issiqlik stansiyalarida yoki batareya tizimlarida: gaz datchiklari vodorodni (batareya xonalaridan yoki kimyoviy reaksiyalardan) nazorat qilishi, pH datchiklari sovutgich yoki tozalovchi suyuqliklarning ruxsat etilgan diapazonda qolishini ta'minlashi va o'tkazuvchanlik zondlari uskunani himoya qilish uchun suv sifatini tekshirishi mumkin. Ushbu kimyoviy parametrlarni ishonchli o'lchash orqali operatorlar tizimning ham unumdorligini, ham xavfsizligini ta'minlay oladilar (masalan, kislotali korroziyani oldini olish yoki xavfli gaz to'planishini erta aniqlash).

7.2 Sanoat va atrof-muhitni monitoring qilishda qo'llanilishi

Kimyoviy va atrof-muhit datchiklari sanoat jarayonlarida ham, atrof-muhitni muhofaza qilishda ham muhim ilovalarni topadi. Asosiy misollardan biri bu elektr

stansiyalarida yoki sanoat obyektlarida o'rnatilgan Emissiyalarni **Uzluksiz Monitoring qilish Tizimlari** (Continuous Emission Monitoring Systems - CEMS). CEMS SO₂, NO_x, CO, CO₂, va O₂ kabi ifloslantiruvchi moddalarni o'lchash uchun mo'ri gazi emissiyalaridan uzluksiz namuna oladigan datchiklar va analizatorlarning yaxlit tizimidir. Odatda, namuna oluvchi zond quvurdan mo'ri gazini tortib oladi, unga ishlov beradi (masalan, zarralarni filtrlaydi va uni quritadi) hamda gaz analizatorlariga yo'naltiradi (ular O₂ uchun elektrokimyoviy hujayralarni, SO₂/NO_x/CO uchun IQ yoki UB analizatorlarni hamda CO₂ uchun paramagnit yoki IQ analizatorlarni o'z ichiga olishi mumkin). Ushbu o'lchovlar emissiya konsentratsiyalari va hisoblangan massa tezligini xabar qilish orqali atrof-muhit qoidalariga rioya etilishini ta'minlaydi. Masalan, quyosh-issiqlik elektr stansiyasini to'ldiradigan ko'mir yoki tabiiy gazli gibrad stansiya o'zining yonish emissiyalarini uzluksiz qayd etish uchun CEMS ga ega bo'ladi va chegaralar oshib ketganda avtomatik signallar ishga tushadi. CEMS dan olingan ma'lumotlar ko'pincha nazorat organlariga yuboriladi va sifat kafolati standartlariga javob berishi kerak (kuzatuv gazlari bilan davriy kalibrlash tekshiruvlari va h.k.).



Rasm 32: CEMS sxemasi (manba: Fuji electric)

HVAC va binolarni boshqarish sohasida **ichki havo sifati (IAQ)** CO₂, uchuvchi organik birikmalar (VOCs) va qattiq zarralar kabi gazlar uchun datchiklar yordamida nazorat qilinadi. **CO₂ datchiklaridan talabga asoslangan shamollatishda (DCV)** foydalanish ayniqsa dolzarbdir. CO₂ bandlikning o'rnini bosuvchi ko'rsatkichidir; odamlar bo'shliqni egallaganda, ular CO₂ chiqaradi va uning konsentratsiyasini oshiradi. Zamonaviy binolarning HVAC tizimlari toza havo oqimini sozlash uchun

CO₂ datchiklaridan foydalanadi, CO₂ ko'tarilganda (odam gavjum xonani bildiradi) shamollatishni oshiradi va energiya tejash uchun odam kam bo'lganda uni kamaytiradi. Masalan, yirik akkumulyatorlarni saqlash inshootida yoki quyosh stansiyasidagi boshqaruv xonasida CO₂ datchiklari xodimlar uchun yetarli shamollatishni ta'minlashi, hushyorlik va salomatlikni rag'batlantirish uchun CO₂ ni qulay darajalarda (odatda ~1000 ppm dan past) ushlab turishi mumkin. IAQ tizimlari, shuningdek, **is gazi datchiklarini** (masalan, zaxira sifatida generator dvigatellari bo'lishi mumkin bo'lgan invertor stansiyalarida) va **vodorod datchiklarini** (akkumulyator xonalari uchun, chunki qo'rg'oshin-kislotali akkumulyatorlar H₂ chiqaradi) o'z ichiga olishi mumkin. Ushbu datchiklar xavfsizlikka hissa qo'shadi, xavfli gazlarning to'planishini aniqlaydi va signallar yoki shamollatish ventilyatorlarini ishga tushiradi. **HVAC havo sifatini** uzluksiz monitoring qilish uskunalarning (sezgir quvvat elektronikasi kabi) xavfsiz muhitda ishlashini ta'minlash uchun tobora ko'proq qattiq zarralar datchiklarini (chang va tutun uchun) va namlik datchiklarini o'z ichiga oladi.

Yana bir muhim qo'llanishi quyosh va gibrid stansiyalarda **suv kimyosi monitoringidir**. Quyosh-issiqlik elektr stansiyalari ko'pincha issiqlik o'tkazuvchi suyuqliklar va bug' sikllariga tayanadi, bu esa o'z navbatida suvga ishlov berish tizimlarini o'z ichiga oladi. Qimmatbaho uskunalarini himoya qilish uchun pH, o'tkazuvchanlik, erigan kislorod va korroziya inhibitori darajalari kabi parametrlar nazorat qilinadi. Masalan, CSP (jamlangan quyosh energiyasi) stansiyasidagi **qozonning ozuqa suvi** tor pH oralig'ida (bir oz asosli, masalan, pH ~9) va erigan qattiq moddalar juda past bo'lishi kerak. Onlayn pH metrlar va o'tkazuvchanlik hujayralari ozuqa suvi va kondensat qaytish liniyalariga o'rnatiladi. Agar pH o'zgarsa yoki o'tkazuvchanlik keskin oshsa (ifloslanish yoki tuz kirib kelishini ko'rsatadi), boshqaruv tizimi chora ko'radi, masalan, kimyoviy oziqlantirishni sozlaydi (pH uchun fosfat, amin dozalash) yoki ifloslangan suvni burib yuboradi. O'tkazuvchanlik monitoringi sovutish minoralari va nometallarni yuvish suvida ham qo'llaniladi. Ta'kidlanganidek, **elektr stansiyalarining suv tizimlarida o'tkazuvchanlik muhim ahamiyatga** ega, chunki u qasmoq yoki korroziyaga olib keladigan ionli aralashmalar mavjudligini ochib beradi. Issiqlik almashtirgichning sovutish suvi pastlog'ida o'tkazuvchanlikning to'satdan oshishi oqishni (mineralga boy xom suvning kirib kelishini) ko'rsatishi mumkin. Shunday qilib, datchiklar signal va boshqaruv sxemalariga ma'lumot beradi: masalan, xususiyatlardan tashqarida bo'lgan suvni avtomatik ravishda to'kish yoki shikastlanish sodir bo'lgunga qadar uskunani o'chirish.

Atrof-muhitni monitoring qilishda sanoat obyektlaridagi datchiklar me'yoriy talablarga rioya qilish va atrof-muhit xavfsizligini ta'minlash uchun

ma'lumotlarni taqdim etadi. Masalan, quyosh panellari ishlab chiqaruvchi zavod chiqindi suvlarni oqizishdan oldin ularni to'g'ri tozalash uchun oqova suvning pH va o'tkazuvchanlik datchiklariga ega bo'lishi mumkin. Quyosh-issiqlik elektr stansiyasi yaqinidagi atrof-muhit havosining sifatini nazorat qilish stansiyalari yer sathidagi ozon yoki NO₂ ni o'lchashi mumkin (ayniqsa stansiyada zaxira tabiiy gaz isitgichi bo'lsa). Quyosh fermalaridagi ob-havo stansiyalari nurlanish datchiklarini o'z ichiga oladi, lekin ko'pincha atrof-muhit harorati va namligini ham o'lchaydi (bu panel ishlashiga va ishchilarning issiqlik qulayligiga tegishli bo'lishi mumkin). Gibridd qayta tiklanadigan obyektlarda (quyosh va biogaz yoki quyosh va dizel zaxirasi kabi) gaz datchiklari chiqindi gazlar yoki metan oqishini nazorat qilishi mumkin.

Va nihoyat, quyosh-issiqlik obyektlarida **xavfsizlik monitoringi** erigan tuzni saqlash tanklaridagi vodorod detektorlari (vodorod yuqori haroratda ma'lum issiqlik o'tkazuvchi suyuqliklar tomonidan hosil qilinishi mumkin) va yopiq joylardagi kislorod datchiklari kabi kimyoviy datchiklarni o'z ichiga olishi mumkin. Uzluksiz monitoring tizimlari ushbu datchiklarni SCADA yoki xavfsizlik PLClari bilan bog'laydi, ular zarur bo'lganda shamollatish, tozalash tizimlari yoki evakuatsiya signallarini ishga tushirishi mumkin. Toza emissiyalarni, sog'lom ichki havoni yoki to'g'ri suv kimyosini ta'minlashidan qat'i nazar, kimyoviy va atrof-muhit datchiklarining integratsiyasi zamonaviy quyosh energiyasi inshootlarida ishonchli va barqaror ishlashning asosi hisoblanadi.

8. Signalni moslashtirish va analog interfeyslar

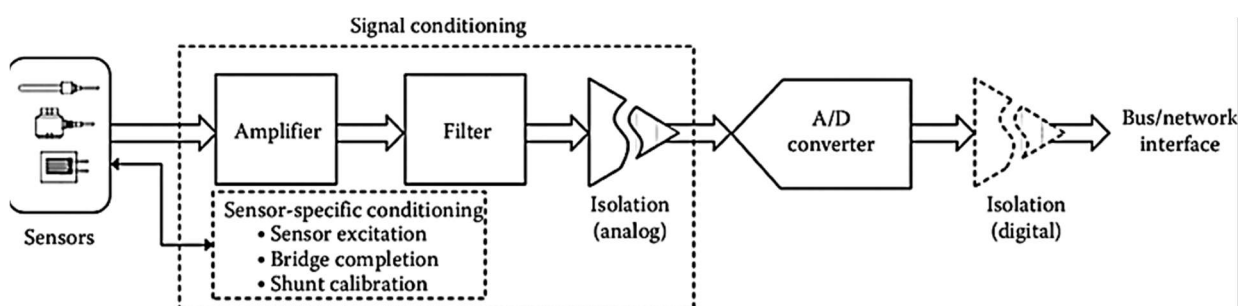
8.1 Signalni filtrlash va kuchaytirish

Datchiklardan olinadigan dastlabki signallar ko'pincha o'lchov asboblari yoki boshqaruv tizimlari tomonidan ishlatilishidan oldin moslashtirishni talab qiladi. Analog signalni moslashtirishning ikkita asosiy jihati **filtrlash** va **kuchaytirishdir**. **Analog filtrlash** datchik signalidan elektr shovqini yoki xalaqitlar kabi keraksiz tarkibiy qismlarni olib tashlash hamda foydali o'lchov ma'lumotlarini saqlab qolish uchun ishlatiladi. Keng tarqalgan misollardan biri, sekin o'zgaruvchi datchik (harorat datchigi kabi) chiqishiga ustma-ust tushadigan yuqori chastotali shovqinni yo'qotish uchun **past chastotali filtrdan** foydalanishdir. Faqat ma'lum bir kesish (cutoff) chegarasidan past bo'lgan chastotalarni o'tkazish orqali past chastotali filtr signalni tekislaydi va o'lchash uchun uning ravshanligini yaxshilaydi. Aksincha, **yuqori chastotali filtr** past chastotali siljish yoki DC og'ishini to'sib qo'yadi, masalan, tebranishni sezishda faqat AC tebranish signali tahlil qilinishi uchun yuqori chastotali filtr DC siljishini olib tashlashi mumkin. Shuningdek, ma'lum chastota signallarini ajratib olish uchun ishlatiladigan polosali filtrlar (ma'lum chastotalar polosasini o'tkazuvchi) (masalan, miltillash chastotasiga sozlangan IR alanga datchigi) va rejektor filtrlar (masalan, 50/60 Hz tarmoq g'uvullashi kabi aniq chastotani to'sib qoluvchi) ham mavjud.

Filtrlar passiv komponentlar (rezistorlar, kondensatorlar, induktivlik g'altaklari) yoki aktiv komponentlar (RC zanjirli operatsion kuchaytirgichlar) yordamida amalga oshirilishi mumkin. Operatsion kuchaytirgichli (op-amp) aktiv filtrlar buferlash va kuchaytirishni ta'minlaydi, bu esa yanada murakkab filtr xarakteristikalarini (Butterworth, Chebyshev va h.k.) hamda kaskadlar orasidagi izolyatsiyani ta'minlashga imkon beradi. Masalan, 4-20 mA bosim o'zgartirgichining chiqishi yaqin atrofdagi o'zgaruvchan chastotali yuritma tomonidan yuzaga keladigan pulsatsiyani olib tashlash uchun filtrlanishi mumkin. Filtrning kesish chastotasi datchik signalining o'tkazish polosasini hisobga olgan holda tanlanishi kerak: juda past kesish chastotasi (juda "sekin" filtr) o'lchovni **buzishi yoki kechiktirishi** mumkin (masalan, aslida muhim bo'lgan o'tkir bosim sakrashini tekislab yuborishi), juda yuqori kesish chastotasi esa shovqinni olib tashlay olmaydi. Raqamli diskretlashdan oldingi filtrlashga nisbatan muhim tushuncha bu Nyquist chastotasidir, ko'pincha kirish o'tkazish polosasini cheklash va yuqori chastotali tarkibning diskretlangan ma'lumotlarga qoplanib (aliasing) qolishining oldini olish uchun ADC dan oldin anti-aliasing (qoplanishga qarshi) past

chastotali filtr o'rnatiladi. Nyquist mezoniga javob berish uchun ushbu analog filtr ADC ning diskretlash chastotasining yarmida yoki undan pastida kesishi kerak.

Kuchaytirish ham xuddi shunday muhimdir, ayniqsa juda kichik signallar ishlab chiqaradigan datchiklar uchun. Masalan, termoparalar harorat farqining har bir gradusi uchun faqat o'nlarcha mikrovolt ishlab chiqaradi; ADC tomonidan o'qilishi uchun bunday signallar yuzlab yoki minglab marta (past shovqin bilan) kuchaytirilishi kerak. Invertlamaydigan yoki differensial kuchaytirgichlar sifatida sozlangan operatsion kuchaytirgichlar kuchaytirish koeffitsiyentini ta'minlay oladi. Datchiklarni moslashtirishda **asbobsozlik kuchaytirgichlari** (instrumentation amplifiers) keng qo'llaniladi; bular ikkala liniya uchun umumiy bo'lgan shovqinni rad etgan holda ikkita signal liniyasi o'rtasidagi farqni kuchaytirish uchun mo'ljallangan, yuqori kirish qarshiligi va yuqori sinfaz xalaqitlarni so'ndirish koeffitsiyentiga ega bo'lgan pretsizion differensial op-amp zanjirlaridir. Datchikning chiqishini mos kuchlanish diapazonigacha kuchaytirish orqali biz **signal-shovqin nisbatini** yaxshilaymiz va signalni ADClar yoki kontrollerlarning kirish diapazoniga moslashtiramiz. Masalan, ko'prikdagi tenzodatchik faqat bir necha millivolt o'zgarishni chiqarishi mumkin; asbobsozlik kuchaytirgichi ADC uchun buni 0-5 V diapazongacha ko'tarishi mumkin. Kuchaytirgichlar, shuningdek, datchikning keyingi kaskadlar tomonidan yuklanmasligini ta'minlab, **buferlashni** ham amalga oshirishi mumkin (op-amp datchik uchun yuqori qarshilikni taqdim etadi). Ba'zida kuchaytirish bitta kaskadda filtrlash bilan birlashtiriladi, masalan, kuchaytirishni ham ta'minlaydigan aktiv past chastotali filtr (kuchaytirish kaskadi filtri deb ataladi).



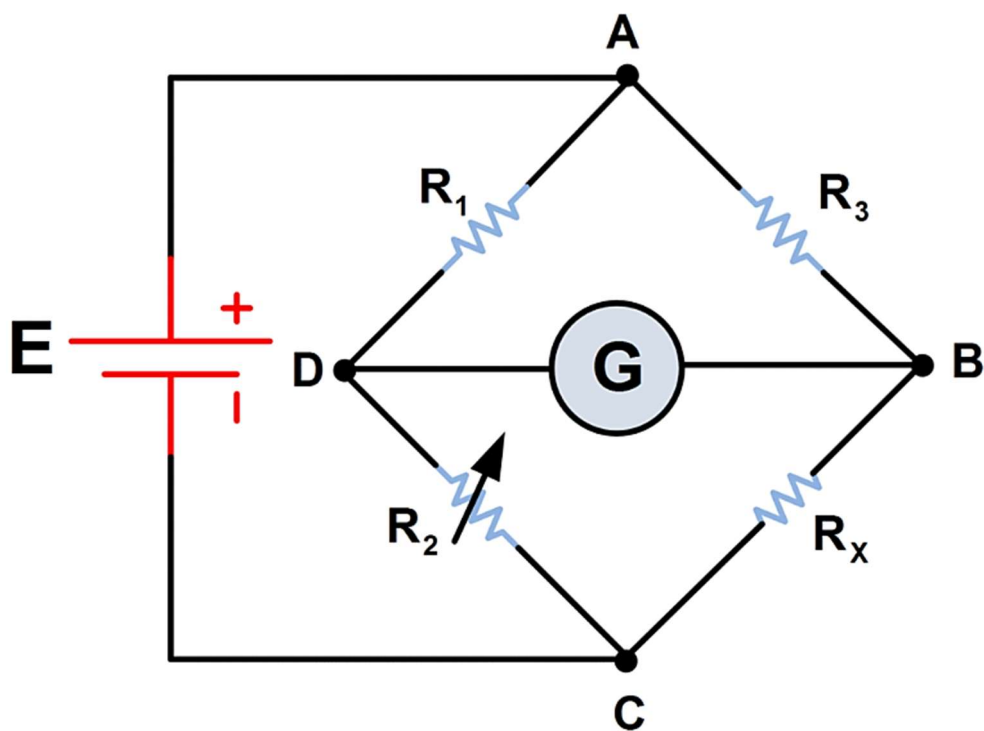
Rasm 33: Signalni filtrlash va kuchaytirish

To'g'ri filtrlash va kuchaytirishning ta'siri datchik signalining ravshanligi va aniqligida yaqqol namoyon bo'ladi. Filtrlashsiz, PV massivdagi uzun kabeldan keladigan harorat signali 50 Hz interferensiyasini yoki yuqori chastotali inverter shovqinini qabul qilib, beqaror ko'rsatkichlarga olib kelishi mumkin. Oddiy RC past chastotali filtr bu xalaqitni o'rtachalashtirishi mumkin, chunki haqiqiy harorat sekin o'zgaradi. Kuchaytirishsiz, kichik ko'prikdatchigining chiqishi ADC ning kirish

shovqiniga ko‘mlib qolishi mumkin; uni kuchaytirish orqali nisbiy kvantlash xatosi kamayadi va o‘lchovning ajrata olish qobiliyati yaxshilanadi. Biroq, bunda murosali jihat mavjud: kuchaytirish datchikdagi har qanday shovqinni ham oshiradi, shuning uchun past shovqinli kuchaytirgichlar va kuchaytirish koeffitsiyentini oqilona tanlash muhimdir (keragidan ortiq kuchaytirmang). Xulosa qilib aytganda, analog filtrlash va kuchaytirish datchikning dastlabki chiqishlarini toza, mos ravishda masshtablangan signallarga aylantiradi, bu ma'lumotlarni raqamlashtirishdan yoki boshqaruv halqasida ishlatishdan oldingi muhim qadamdir.

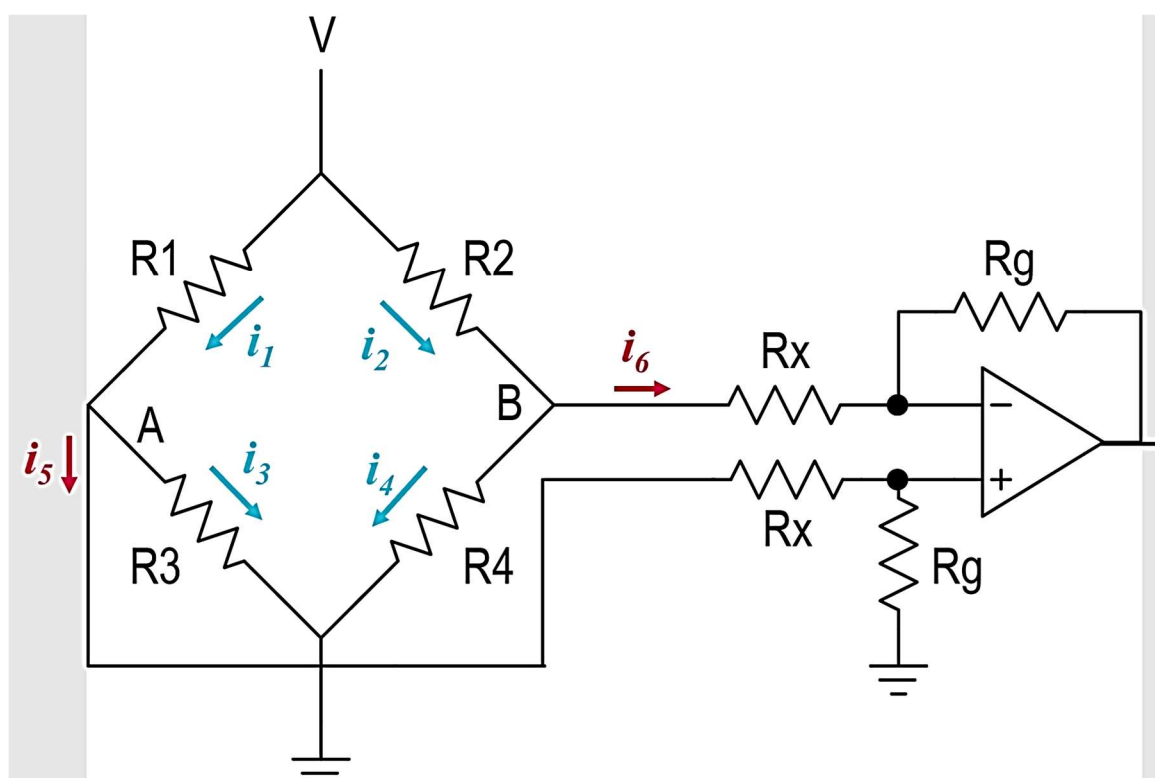
8.2 Ko‘prik zanjirlari va analog signallarni dastlabki qayta ishlash

Ko‘pgina datchiklar fizik o‘zgarishlarni qarshilik o‘zgarishlariga aylantiradi, bunga tenzodatchiklar, termistorlar (haroratga sezgir rezistorlar) va pyezorezistiv bosim datchiklari misol bo‘la oladi. Kichik qarshilik o‘zgarishlarini aniq o‘lchash uchun Wheatstone ko‘prik zanjirlari keng tarqalgan yechim hisoblanadi. Wheatstone ko‘prigi romb shaklida joylashgan to‘rtta rezistiv elementdan iborat bo‘lib, ko‘prik bo‘ylab uyg‘otish kuchlanishi qo‘llaniladi va ikkita bo‘luvchi tarmoqning o‘rta nuqtalari orasida differensial o‘lchov olinadi. Noma'lum yoki o‘zgaruvchan rezistor (datchik) ko‘prikning bir yoki bir nechta yelkasiga joylashtiriladi. Ko‘prik muvozanatlashganda (ikkala tarmoqda ham nisbatlar teng bo‘lganda), differensial chiqish nolga teng bo‘ladi. Datchikning qarshiligi o‘zgarganda (deformatsiya, harorat va hokazolar tufayli), ko‘prik muvozanatdan chiqadi va chiqishda qarshilik o‘zgarishiga proporsional bo‘lgan kichik kuchlanish paydo bo‘ladi. Ushbu konfiguratsiya juda samaralidir, chunki u sezgirlikni oshiradi (differensial chiqish har bir kichik o‘zgarish uchun millivolt oralig‘ida bo‘lishi mumkin, bu esa o‘lchash imkonini beradi) va agar simmetrik tarzda amalga oshirilsa, harorat kabi sinfaz ta'sirlarni tabiiy ravishda kompensatsiya qiladi. Masalan, tenzodatchikli yuk xujayrasida odatda to‘rtta tenzodatchik ko‘prikka biriktiriladi: ikkitasi cho‘zilishni va ikkitasi siqilishni boshdan kechiradi, shuning uchun ularning qarshiliklari qarama-qarshi yo‘nalishda o‘zgaradi, bu esa kattaroq umumiy chiqishni beradi hamda haroratni kompensatsiya qiladi (har to‘kala datchik ham harorat ta'sirida bir xil o‘zgaradi, shuning uchun bu ta'sir bekor qilinadi).



Rasm 34: Wheatstone ko'prigi sxemasi

Ko'priknining chiqishi kichik differensial kuchlanish bo'lib, u hatto bir necha volt bilan uyg'otilganda ham to'liq shkalada ko'pincha atigi bir necha millivoltni tashkil qiladi. Shuning uchun, analog signallarni dastlabki qayta ishlash talab etiladi: xususan, ko'priknining chiqishini kuchaytirish uchun differensial kuchaytirgich (yoki asbobsozlik kuchaytirgichi) ishlatiladi. Asbobsozlik kuchaytirgichi ikkita ko'priknining chiqish tugunini oladi va ularning ikkalasi uchun umumiy bo'lgan har qanday kuchlanishni (uyg'otishning sinfaz kuchlanishini) rad etgan holda, ular orasidagi farqni kuchaytiradi. Sinfaz xalaqitlarni bunday yuqori darajada so'ndirish juda muhim, chunki ko'priknining, aytaylik, 10 V da uyg'otilishi mumkin va ikkala chiqish ham atigi bir necha millivolt farq bilan uning taxminan yarmida (5 V atrofida) turadi. Sifatli differensial kuchaytirgich 5 V umumiy daraja yoki ikkala liniyaga ham ta'sir qiluvchi tashqi shovqinlar ostida qolib ketmasdan, bu kichik farqni kuchaytiradi. Bu analog signallarni dastlabki qayta ishlashning bir misolidir: manbaning o'zida datchikning differensial signalini kuchaytirish orqali biz quyi oqimdagi ADC yoki kontrollerga ancha kuchliroq, shovqinga chidamli signalni yuboramiz. Masalan, termopara ko'pincha uni dastlab sovuq chok kompensatsiyasiga ega ko'priknining yoki differensial kuchaytirgichga uzatish orqali o'lchanadi, bu esa o'nlab mikrovoltli signalni voltlarga ko'taradi.



Rasm 35: Wheatstone ko'prigi, differensial kuchaytirgich bilan birga

Ko'prik zanjirlarida haroratni kompensatsiya qilish yana bir muhim jihatdir. Ko'pgina rezistiv datchiklarga o'lchanadigan ta'sirdan tashqari atrof-muhit harorati ham ta'sir qiladi. Wheatstone ko'prigida, agar qarama-qarshi yelkada "soxta" datchik yoki haroratga sezgir rezistor ishlatilsa, u harorat ta'sirini bekor qilishi mumkin. Masalan, tenzodatchik sxemasida strukturadaning deformatsiyalanmagan qismiga aynan bir xil datchikni joylashtirish (yoki yuklanmagan, lekin bir xil haroratda bo'lgan aktiv soxta datchikdan foydalanish) yonma-yon yelkadagi ikkala datchikning ham harorat o'zgarishi bilan qarshiligi bir xil o'zgarishini anglatadi, shuning uchun ko'prik harorat o'zgarishlari uchun muvozanatda qoladi, lekin deformatsiya farqlari uchun muvozanatdan chiqadi. Shuningdek, haroratni o'lchash uchun termistorga asoslangan ko'priklar ko'rsatkichni chiziqli holatga keltirish yoki kompensatsiya qilish uchun o'xshash harorat koeffitsiyentlariga ega bo'lgan o'zgarmas rezistorlardan foydalanishi mumkin. Pretsizion zanjirlarda ishlab chiqaruvchilar kompensatsiya formulasi yoki qo'shimcha sezuvchi elementlarni taqdim etishi mumkin; masalan, bosim o'zgartirgichlarida ko'pincha qurilma haroratini o'lchash uchun kichik termistor bo'ladi va keyin analog sxemalar (yoki raqamli post-ishlov berish) ushbu o'lchov asosida ko'prik chiqishini to'g'rilaydi..

Ko'priklardan tashqari, analog signallarni dastlabki qayta ishlash ma'lum datchiklar uchun RC zanjirlari yoki chiziqlilashtirgichlardan foydalanishni o'z ichiga oladi. Bunga yaxshi misol termoparadir: tarixan, atrof-muhit haroratidagi tayanch chokini hisobga oladigan tuzatish kuchlanishini qo'shish uchun analog

kompensatsiya zanjirlari (polinomial zanjirlar yoki sovuq chok kompensatsiyasi IClari yordamida) ishlatilgan. Boshqa bir misol: fotovoltaiik elementning IV-xarakteristikasini o'lashda, tok kuchining keng dinamik diapazonini siqish uchun logarifmik kuchaytirgichdan foydalanish mumkin. Biroq, zamonaviy amaliyotda ushbu vazifalarning ko'pchiligi ADC dan keyin raqamli tarzda bajarilishi mumkin. Shunga qaramay, raqamlashtirishdan oldin dinamik diapazonni optimallashtirish va shovqinni kamaytirish uchun analog darajadagi signalni moslashtirish (ko'priklar, kuchaytirgichlar, filtrlar) bebahodir. Yaxshi ishlab chiqilgan analog kirish qismi keyingi raqamli tizim o'zining kirish diapazonidan to'liq foydalanadigan va xalaqitlar minimallashtirilgan signalni ko'rishini ta'minlaydi. Bu raqamli to'g'rilashga kamroq yuk tushishini va umuman olganda, ishonchliroq o'lchovni anglatadi.

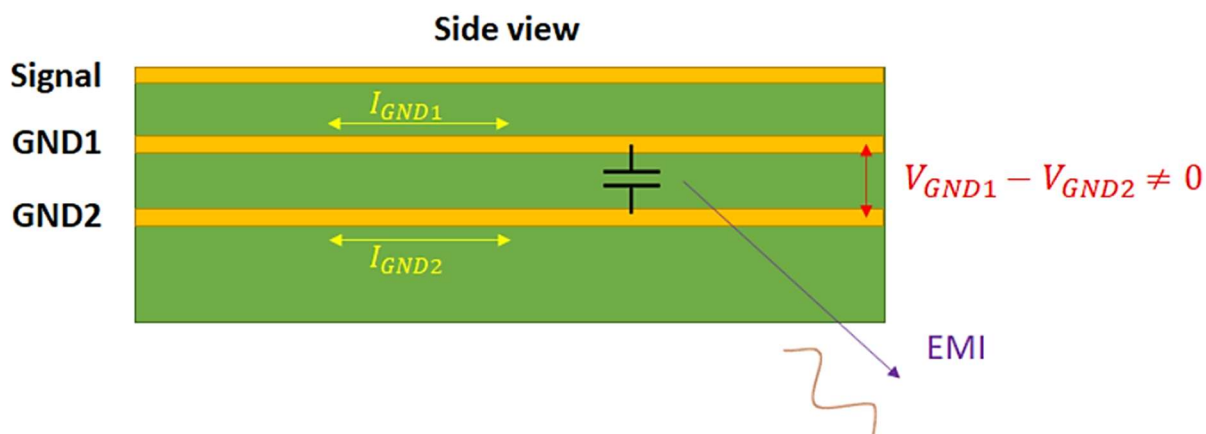
Xulosa qilib aytganda, Wheatstone ko'priklari sezgirliigi va o'zini o'zi kompensatsiya qilish xususiyatlari tufayli rezistiv datchiklarni ulashda asosiy element bo'lib qolmoqda. Differensial kuchaytirish va tayanch elementlardan oqilona foydalanish bilan birgalikda ular xalaqitlarni (sinfaz kuchlanish yoki bir xil harorat siljishi kabi) bekor qilib, kerakli signalni (deformatsiya yoki harorat o'zgarishi kabi) ajratib oladigan analog signallarni dastlabki qayta ishlash birliklarini tashkil qiladi. Ushbu kirish qismi dizaynlari pirovardida sanoat datchiklari o'lchovlarida yuqoriroq aniqlik va barqarorlikka hissa qo'shadi.

8.3 Signal yaxlitligi va shovqin muammolari

Analog signallarni (datchiklardan olinadigan kichik millivoltli chiqishlar yoki stansiyadagi analog boshqaruv signallari kabi) uzatishda signal yaxlitligini saqlash asosiy muammo hisoblanadi. Uzun kabellar liniyalari, uskunalar (masalan, invertorlar, motorlar) keladigan elektr xalaqitlar va yer potentsiallari farqlari shovqin yoki xatolarni keltirib chiqarishi mumkin. Ushbu muammolarni yumshatish uchun bir nechta amaliyotlar qo'llaniladi: to'g'ri yerga ulash, ekranlash va simlarni o'tkazish usullari, shuningdek, sinfaz shovqinlarni so'ndirishdan foydalanish uchun differensial signal uzatish.

Yerga ulash fundamental ahamiyatga ega, lekin ko'pincha yirik inshootlarda murakkab bo'ladi. Ideal holatda, datchik signallari toza, barqaror yerga ulashga tayanishi kerak. Agar tizimning ikki qismi turli xil yer potentsiallariga ega bo'lsa (yirik obyektlarda tez-tez uchraydigan holat), yer yoki tayanch simlari orqali tok kuchi oqishi mumkin, bu yer halqasi deb ataladi va u o'lchanadigan signalga keraksiz kuchlanishni ustma-ust tushiradi. Masalan, agar termopara uzoqdagi rezervuarda yerga ulangan bo'lsa va shuningdek, boshqaruv xonasi yeriga tayansa, bir necha

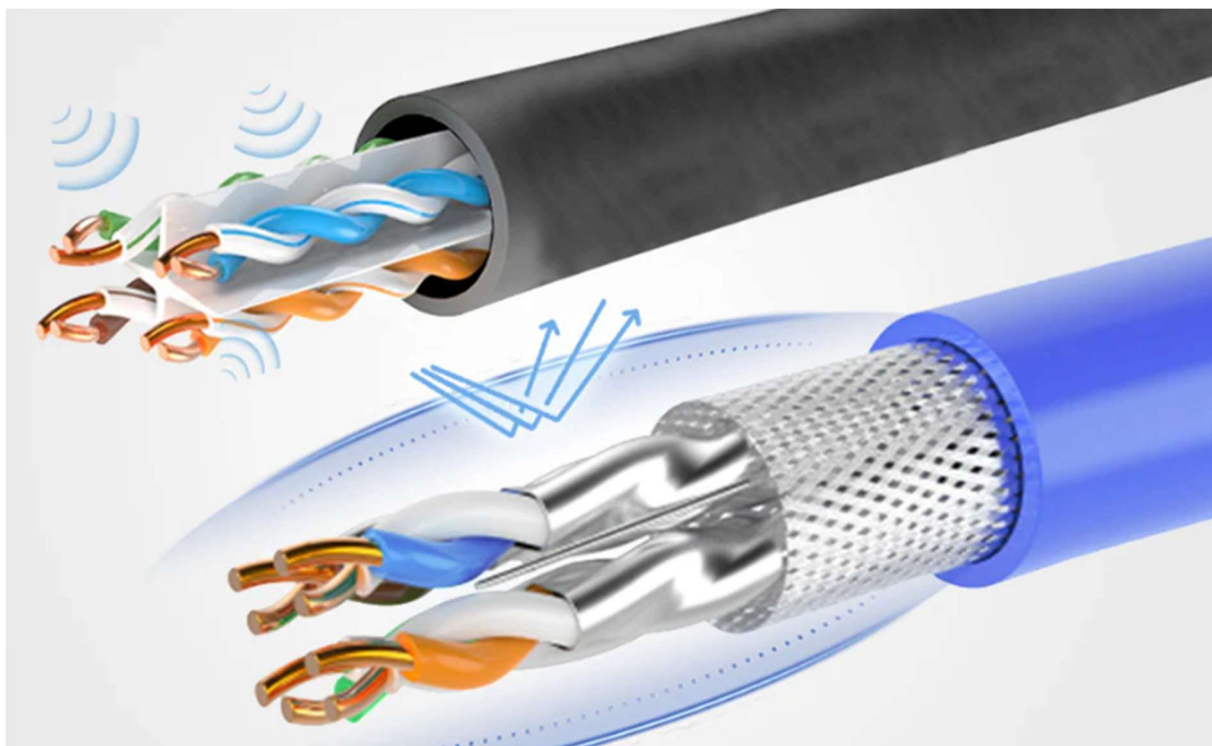
millivoltlik yer farqi mikrovolt darajasidagi signalni bosib ketishi mumkin. Bunga yo'l qo'ymaslik strategiyasi bir nuqtali yerga ulashdir: ekran yoki qaytish simini faqat bitta uchida tayanch qilib oling va yuqori tok kuchi uskunalarining yerga ulanishi asboblardan yeridan alohida bo'lishini ta'minlang. Ko'pincha, analog signal kabellari ko'p sonli qaytish yo'llarining oldini olish uchun faqat o'qish uchida yerga ulanadi. O'lchovlar uchun differensial kirishlardan foydalanish (asbobsozlik kuchaytirgichlarida muhokama qilinganidek) yuqori sinfaz shovqinlarni so'ndirishni ta'minlaydi, hattoki ikkala liniya ham yerga nisbatan qandaydir shovqinni qabul qilsa-da, differensial kuchaytirgich bu umumiy komponentni e'tiborsiz qoldiradi. Aslini olganda, yuqori CMRR kirishi faqat signal sifatida mo'ljallangan potentsiallar farqini o'qish orqali yer bilan bog'liq xalaqitlarni nazorat qilish vazifasini bajaradi. Shuning uchun ham ko'plab sanoat datchiklari 4-20 mA halqalar yoki differensial kuchlanishlar ko'rinishida uzatiladi: qabul qiluvchi mutlaq yerni emas, balki faqat farqni yoki tok kuchini hisobga oladi.



Rasm 36: PCB dizaynda “yerga” ulashdagi muammolar

Kabellarni ekranlash elektrostatik shovqinlarga (sig'imli bog'lanish) qarshi asosiy himoya hisoblanadi. Kabel ekrani signal o'tkazgichlari atrofidagi o'tkazuvchan qatlam (o'rim yoki folga) bo'lib, u elektr maydoni xalaqitlarini tutib qoladi va ularni yerga o'tkazadi, bu esa signal simlarida tok kuchi induksiyanishining oldini oladi. Ekranning to'g'ri yerga ulanishi juda muhimdir, suzuvchi (yerga ulanmagan) ekran samarasiz yoki u hatto antenna vazifasini bajarib, shovqinni yomonlashtirishi ham mumkin. Odatda, ekranning bir uchi (ko'pincha boshqaruv tizimi uchi) asbob yeriga ulanadi. Bu induksiyalangan tok kuchi uchun qaytish yo'lini ta'minlaydi va ularni signal o'tkazgichlaridan uzoqlashtiradi. Masalan, quyosh stansiyasi bo'ylab markaziy kontrollerga 0-10 V analog signalni uzatuvchi uzun kabelni ko'rib chiqing: ekranlashsiz, yaqin atrofdagi yuqori quvvat liniyasi unga 50 Hz shovqinni sig'imli tarzda ulashi mumkin. Yerga ulangan ekran bo'lsa, shovqin tok kuchi signal simi orqali emas, balki ekran orqali yerga oqib o'tadi va signal yaxlitligini saqlaydi. Juda

shovqinli muhitlar uchun ikki marta ekranlangan kabellar yoki kabel kanallarini yerga ulashdan foydalanish mumkin. Shuningdek, har qanday ulagichlar orqali ekran uzluksizligini saqlash va ekranlar orqali yer halqalarini yaratishdan qochish muhimdir (shu sababli bir nuqtali yerga ulash qoidasi mavjud).



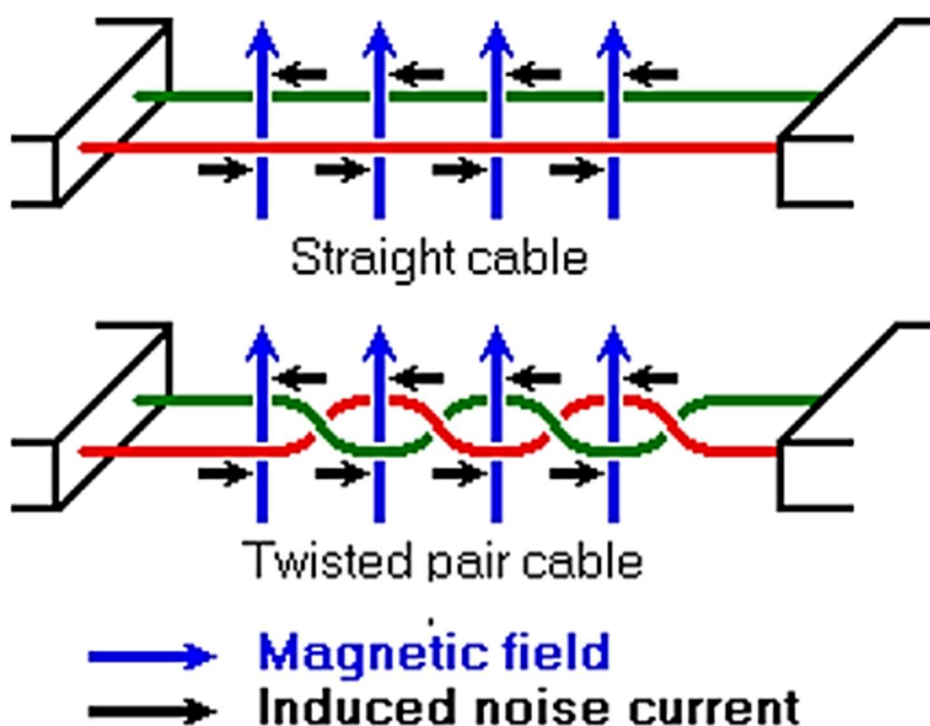
Rasm 37: Kabellarni ekranlash elektrostatik shovqinlarni (EMI) kamaytiradi

O'ralgan juftlik simlari magnit xalaqitlarga (induktiv bog'lanish) qarshi oddiy, ammo kuchli usuldir. Differensial signalni olib o'tuvchi ikkita o'tkazgich bir-biriga o'ralganda, har qanday tashqi magnit maydoni yonma-yon o'ramlarda teng va qarama-qarshi kuchlanishlarni induksiyalaydi, ular differensial qabul qiluvchi tomonidan ko'rilganidek o'zaro bekor qilinadi. Masalan, shu sababli RS-485 yoki analog tok kuchi halqalari o'ralgan juftliklarda o'tkaziladi; bu motorlar yoki transformatorlarning adashgan maydonlaridan xalaqit qabul qilishni keskin kamaytiradi. Amalda, past darajali signallar uchun analog datchik kabellari (ko'prik chiqishlari kabi) ikkala usulni birlashtirgan ekranlangan o'ralgan juftliklardir. Yuqori chastotali magnit maydonlari sezgir analog zanjirlar atrofida temir kabel kanallari yoki mu-metall ekranlardan foydalanish orqali ham yumshatilishi mumkin, garchi ko'pgina sanoat chastotalari uchun odatda o'rash yetarli bo'ladi.

Boshqa amaliyotlar qatoriga to'g'ri kabel yotqizish, analog signal kabellarini quvvat kabellaridan ajratish kiradi. Quyosh stansiyasida asbob simlarini invertorning AC kabellaridan uzoqroqqa yotqizish yoki o'zaro ta'sirni minimallashtirish uchun ularni hech bo'lmaganda to'g'ri burchak ostida kesishib o'tishini ta'minlash kerak. Datchikni uyg'otish va kuchaytirgichlar uchun past

shovqinli quvvat manbalaridan foydalanish ham shovqin kirib kelishining oldini oladi. Ayrim hollarda, o'rnatilgan izolyatsiya kuchaytirgichlariga ega bo'lgan signalni moslashtirish modullaridan foydalanish mumkin, ular har qanday galvanik aloqani uzadi va shu tariqa optik bog'lanish yoki transformator izolyatsiyasi orqali yer halqasi muammolarini butunlay yo'q qiladi.

Bunga bog'liq bo'lgan muammo - bu differensial liniyalardagi sinfaz shovqindir. Hattoki differensial datchik bilan ham, juda katta sinfaz tebranishlar kuchaytirgichni to'yintirib qo'yishi mumkin. Aytaylik, agar uzun termopara simi yashin urishi induksiyasidan kelib chiqadigan yuqori kuchlanishli sakrashni qabul qilsa, u kirish qismiga zarar yetkazishi mumkin. Bunday keskin sakrashlarni yutish uchun o'tkinchi jarayonlarni so'ndirgichlar yoki sinfaz drossellar ishlatilishi mumkin. Shuningdek, asbob signallari uchun kabel lotoklari yerga ulanganligini ta'minlash va ehtimol kirish nuqtalarida kuchlanish sakrashidan himoyaga ega bo'lishi (masalan, yuqori kuchlanish sakrashlarini kesib qolish uchun MOVs yoki gaz razryadli naychalardan foydalanish) bunday hodisalar paytida analog signallarning yaxlitligini himoya qilishi mumkin.



Rasm 38: O'ralgan juftlik simlarining afzalliklari

Va nihoyat, har qanday qoldiq shovqinni yanada tekislash uchun analog sohada shovqinni filtrlash qo'llaniladi. Analog kirishdagi kichik RC filtr ekranlashdan o'tib ketgan yuqori chastotali xalaqitlarni olib tashlashi mumkin. Biroq, loyihachilar ehtiyot bo'lishlari kerak: haddan tashqari filtrlash boshqaruv halqalarida faza

kechikishini keltirib chiqarishi yoki aslida muhim bo'lgan tezkor o'tkinchi jarayonlarni niqoblashi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, analog signal yaxlitligini saqlashga kompleks yondashuv orqali erishiladi: yaxshi kabel o'tkazish (o'ralgan, ekranlangan juftliklar), halqalarni oldini olish uchun to'g'ri bir nuqtali yerga ulash, elektr maydoni shovqinini qaytarish uchun ekranlash, sinfaz xalaqitlarni bekor qilish uchun differensial o'lchash va xalaqit manbalaridan fizik jihatdan ajratish. Ushbu amaliyotlarga rioya qilish orqali, hatto sanoat quyosh stansiyasining shovqinli muhitida ham mikrovolt darajasidagi signallarni minimal buzilishlar bilan ishonchli uzatish mumkin.

9. Ma'lumotlarni yig'ish tizimlari (DAQ)

9.1 Diskretlash, ADClar va ma'lumotlarni konversiya qilish

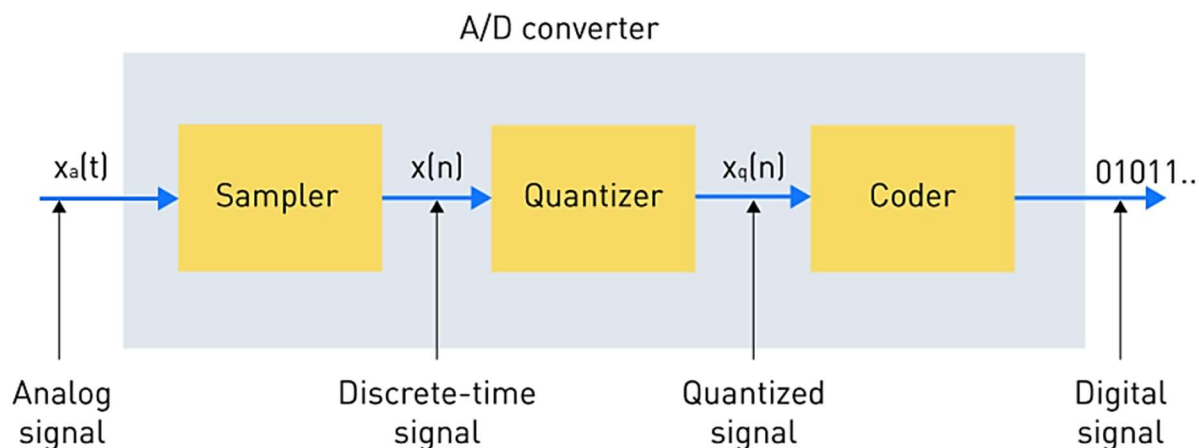
Raqamli ma'lumotlarni yig'ish (DAQ) tizimlari analog datchik chiqishlari va raqamli qayta ishlash o'rtasidagi ko'prikdir. Diskretlash - bu muntazam oraliqlarda ko'rsatkichlarni olish orqali uzluksiz vaqt signalini diskret vaqt ma'lumotlariga aylantirish jarayonidir. Diskretlash chastotasini tanlash Nyquist mezonini bilan belgilanadi: f_s diskretlash chastotasi signalda mavjud bo'lgan eng yuqori chastota komponentidan ikki baravar katta bo'lishi kerak, bu ko'pincha shunday ifodalanadi

$$f_s > 2 \cdot f_{max}$$

Bu signalni qoplanish (aliasing)siz qayta tiklash yoki tahlil qilishni ta'minlaydi, bu yetarli darajada diskretlanmaslik tufayli yuqori chastotali komponentlar past chastotalar sifatida niqoblanganda yuzaga keladigan buzilishdir. Masalan, agar quyosh invertorining AC chiqishi diskretlanayotgan bo'lsa (u, aytaylik, 500 Hz gacha bo'lgan sezilarli garmonikalarni o'z ichiga olishi mumkin), ushbu garmonikalarning qoplanishiga yo'l qo'ymaslik uchun 1000 Hz dan ancha yuqori chastotada diskretlash kerak. Amaliyotda, to'lqin shaklining yaxshi tasvirini olish uchun muhandislar ko'pincha qiziqish uyg'otadigan eng yuqori chastotadan 5-10 marta yuqori chastotada diskretlaydilar. Sekin o'zgaruvchi signallar (quyosh-issiqlik saqlash tankidagi harorat kabi) har bir necha soniya yoki daqiqada faqat bitta namunani talab qilishi mumkin, holbuki tezkor o'tkinchi jarayonlar (PV tizmasidagi yoyli qisqa tutashuv belgilari kabi) kilogerts yoki hatto MHz diapazonidagi diskretlashni talab qilishi mumkin.

DAQ ning markazida analog kuchlanishni (yoki tok kuchini) raqamli sonlarga kvantlaydigan Analog-Raqamli O'zgartirgich (ADC) yotadi. ADClar diskret darajalar sonini belgilaydigan ma'lum bir ajrata olish qobiliyatiga (bitlar soniga) ega. Masalan, 12 bitli ADC o'zining kirish diapazoni bo'ylab darajalarga ega. Haqiqiy analog qiymat va ifodalanishi mumkin bo'lgan eng yaqin raqamli daraja o'rtasidagi farq kvantlash xatosi bo'lib, ideal ADC uchun u eng ko'pi bilan bitta LSB (eng kichik ahamiyatli bit - least significant bit) ning yarmiga teng. Bu shuni anglatadiki, ideal ADC o'lchovga asosan $\pm 0,5$ LSB shovqin/noaniqlik qo'shadi. Yuqori ajrata olish qobiliyatiga bo'lgan ehtiyojlar uchun 16 bitli yoki 24 bitli ADClardan (bosim, harorat va boshqalar uchun asboblarda keng tarqalgan) foydalanish mumkin, bu kvantlash qadam o'lchamini keskin kamaytiradi. Kvantlash xatosini signalga qo'shilgan kichik shovqin sifatida ko'rish mumkin; masalan, 0-10 V diapazondagi 16 bitli ADC taxminan 0,15 mV LSB ga ega, shuning uchun kvantlash xatosi $\pm 0,075$ mV ni tashkil qiladi - bu ko'pgina datchiklar uchun e'tiborga olinmaydigan darajada

kichikdir. Biroq, agar qiziqish uyg'otayotgan signal diapazonga nisbatan juda kichik bo'lsa, samarali ajrata olish qobiliyati yo'qoladi (shuning uchun 8.1-bo'limda muhokama qilinganidek kuchaytirishga ehtiyoj tug'iladi). Yuqori chastotada diskretlash (oversampling) va o'rtachalashtirish kabi usullar bir nechta namunalarni o'rtachalashtirish kasr-bitli ajrata olish qobiliyatini yaxshilashni yuzaga keltirishi mumkinligidan foydalanib, kvantlash shovqinini yanada kamaytirishi mumkin.



Rasm 39: ADC ishlash prinsipi

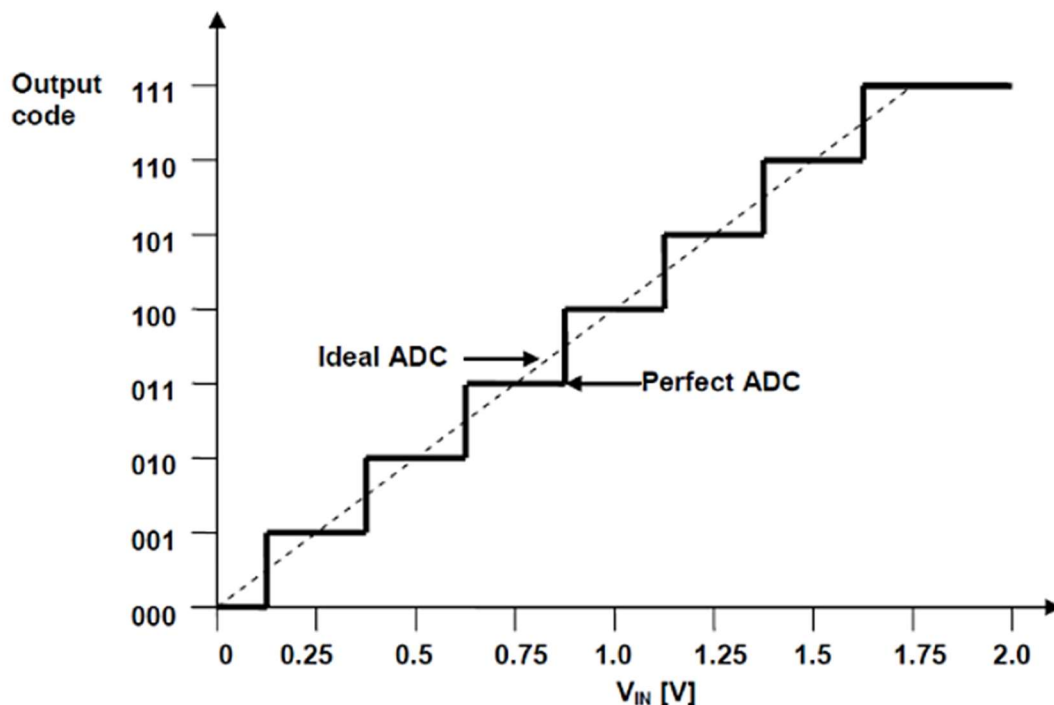


Figure 40: ADC kvantlash xatosi

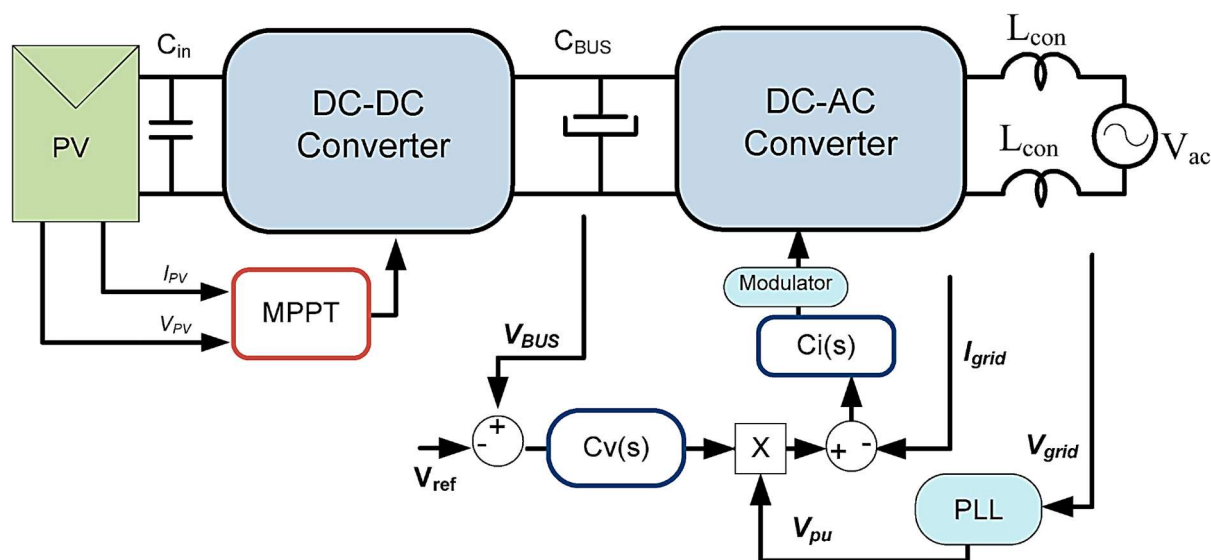
Muhim e'tibor signallarning turli xillariga moslashtirilgan diskretlash strategiyasiga qaratiladi. Masalan, quyosh nurlanishi datchigida (piranometr)

ehtimol 1 Hz dan (bulut o'tishidagi o'tkinchi jarayonlar) yuqori sezilarli chastota tarkibi bo'lmaydi, shuning uchun uni 1 Hz yoki 10 Hz da diskretlash yetarlidan ham ortiqdir. Boshqa tomondan, issiqlik saqlash tankidagi harorat datchigi juda sekin o'zgaradi (balki soatiga bir necha gradus), shuning uchun uning dinamikasini qayd etish uchun har 30 soniya yoki 1 daqiqada bitta namuna olish yetarli bo'lishi mumkin. Sekin signalni yuqori chastotada diskretlash (keragidan ko'ra ancha ko'p namunalar olish) o'rtachalashtirish orqali tasodifiy shovqinni kamaytirishi mumkin, ammo ma'lum bir nuqtadan o'tgach samara pasayadi va u ma'lumotlarni saqlash hamda qayta ishlash yukini oshiradi. Oqim sarfi datchiklari oqimga proporsional bo'lgan analog yoki chastota chiqishlarini ishlab chiqarishi mumkin; ularning tegishli o'tkazish polosasi tizimda oqimning qanchalik tez o'zgarishi mumkinligiga bog'liq (garchi kichik tebranishlar yoki turbulentlik filtrlash mumkin bo'lgan yuqori chastotali shovqinni keltirib chiqarsa-da, odatda yirik quvurlar tizimlari uchun atigi bir necha Hz).

AC elektr signallari uchun (tarmoq kuchlanishi yoki tok kuchini o'lchash kabi), agar garmonik tahlil yoki cho'qqilarni aniqlash kerak bo'lsa, to'lqin shaklini ushlab qolish uchun yetarlicha tez diskretlash (masalan, 50/60 Hz quvvat to'lqin shakli uchun 5-10 kHz da) strategiyalardan biridir. Shu bilan bir qatorda, agar faqat RMS qiymati kerak bo'lsa, ba'zi tizimlar tez diskretlaydi va RMSni raqamli hisoblaydi yoki analog RMS-DC o'zgartirgichlardan foydalanadi va DC chiqishini sekin diskretlaydi. Nyquist teoremasi eng kam tezlikni belgilaydi, ammo amalda loyihachilar qoplanishga qarshi (anti-alias) filtni ham hisobga olishlari kerak; masalan, agar siz 50 Hz li to'lqinni 128 Hz da diskretlasangiz, nazariy jihatdan yetarli bo'lsa ham, qoplanishning oldini olish uchun 64 Hz dan yuqori har qanday tarkib filtrlanishi kerak. Bu har qanday shovqin yoki garmonikalarni o'z ichiga olishi mumkin, shuning uchun ko'pincha yetarli chegara (masalan, 1 kHz da diskretlash va raqamli filtrlash kabi) tanlanadi.

Boshqa bir jihat - kvantlash va dinamik diapazon. Kichik va katta signallarni birgalikda o'lchash misolini olaylik: agar bitta ADC keng dinamik diapazonni qamrab olishi kerak bo'lsa (aytaylik, akkumulyator kuchlanishini 16 bitli ajrata olish qobiliyati bilan 0 dan 1000 V gacha o'lchash), kvantlash qadami ~ 15 mV ni tashkil qiladi. Agar 1 mV o'zgarishlarni aniqlash kerak bo'lsa, bitta diapazon yetarli bo'lmaydi, strategiyalar avtomatik diapazonni tanlashni (ADC shkalalarini almashtirish) yoki turli xil dastlabki kuchaytirishga ega bo'lgan bir nechta ADC kanallaridan foydalanishni o'z ichiga oladi. Quyosh energiyasi sohasida buni IV-egrilik chizgichlarida ko'rish mumkin: ular elementning ochiq zanjirli kuchlanishini aniq o'lchash uchun avtomatik diapazonni tanlashi va keyin egriklik tirsagiga (knee) kattaroq ajrata olish qobiliyati bilan yaqinlashishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, DAQ loyihalash diskretlash chastotasining Nyquist mezonini qanoatlantirishini va kerakli ma'lumotlarni yig'ishini ta'minlashdan boshlanadi. Keyin u kvantlash xatosini minimallashtirish va datchikning chiqish qamrovini yopish uchun ADC ning ajrata olish qobiliyati va diapazoni yetarli bo'lishini ta'minlaydi. Har xil turdagi signallarga har xil yondashuv qo'llaniladi: yuqori chastotali signallar tez diskretlanadi, sekinlari esa ehtimol o'rtachalashtiriladi; shuningdek, qoplanish va shovqinning oldini olish uchun diskretlashdan oldin va keyin ehtiyotkorlik bilan filtrlash (analog yoki raqamli) amalga oshiriladi. Ushbu tamoyillarga rioya qilish orqali raqamli ma'lumotlar quyosh energiya tizimining analog realligini ishonchli tarzda ifodalaydi, bu esa aniq monitoring va tahlil qilish imkonini beradi.



*Rasm 41: Soddalashtirilgan MPPT algoritmi namunasi, elektr tarmoqqa ulangan
PV tizimlari uchun*

9.2 Real vaqt rejimida ma'lumotlarni yig'ish tizimlari

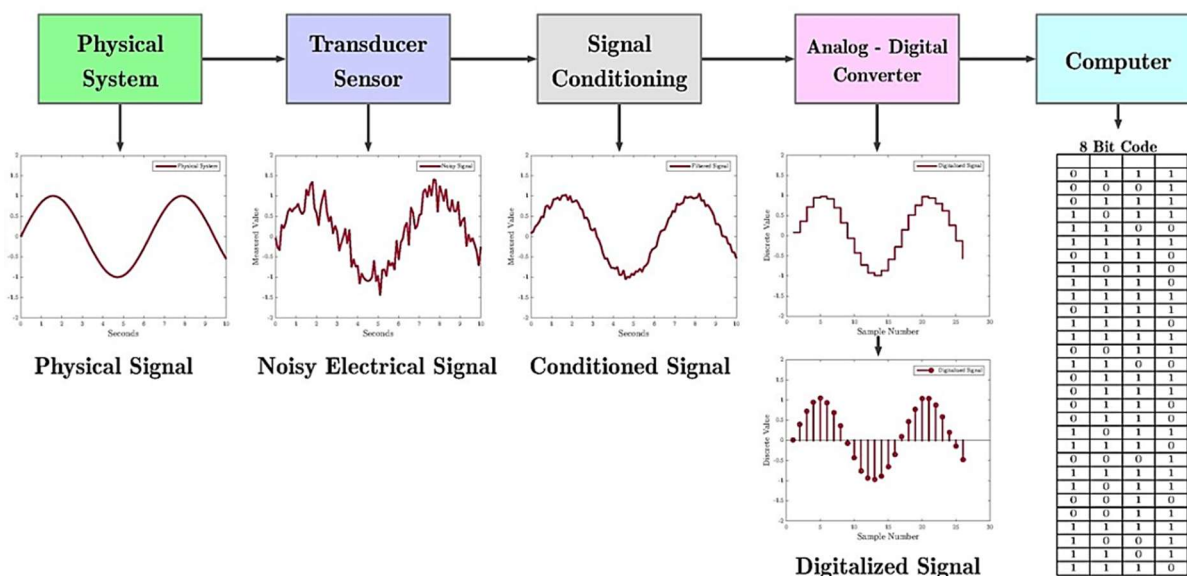
Ko'pgina sanoat va energetika ilovalarida ma'lumotlarni shunchaki yig'ish yetarli emas, bu real vaqt rejimida, ya'ni qat'iy vaqt cheklovlari doirasida va ko'pincha deterministik xatti-harakatlar bilan amalga oshirilishi kerak. Real vaqt rejimida ma'lumotlarni yig'ish tizimi (DAQ) – bu ma'lumotlarni belgilangan tezlikda uzluksiz yoki oldindan aytib bo'lmaydigan kechikishlarsiz yozib olish va qayta ishlashni kafolatlaydigan tizimdir. Determinizm tizimning belgilangan muddat ichida vazifalarni izchil bajarish qobiliyatini anglatadi. Masalan, real vaqt rejimidagi DAQ datchikni har 1 millisoniyada diskretlashi va boshqaruv chiqishini, aytaylik, 5 millisoniya ichida yangilashi kerak bo'lishi mumkin. To'liq deterministik tizim nolinch vaqt jitterni (tebranishini) ta'minlab, har doim 1 ms va 5 ms belgilariga aniq rioya qiladi. Amaliyotda har doim qandaydir jitter bo'ladi (yaxshi tizimda mikrosiniyalar tartibida bo'lishi mumkin), ammo maqsad uni tizim ishlashiga ta'sir qiladigan chegaradan ancha past darajada ushlab turishdir.

Real vaqt rejimidagi cheklovlar yopiq halqali boshqaruv kabi ssenariylarda yuzaga keladi. Nometallarning o'rinlari qayta aloqa tizimi tomonidan faol boshqariladigan quyosh-issiqlik stansiyasini yoki o'ta yuqori tok kuchi sharoitlariga millisoniyalar ichida reaksiya bildirishi kerak bo'lgan akkumulyatorlarni boshqarish tizimini ko'rib chiqing. Bu yerdagi DAQ va boshqaruv tizimi beqarorlik yoki o'tkazib yuborilgan himoya harakatlarining oldini olish uchun deterministik jadval asosida ishlashi kerak. Bu vaqt belgilaridagi vaqti-vaqti bilan kechikishlar yoki jitterlar qabul qilinishi mumkin bo'lgan real vaqt rejimida bo'lmagan ma'lumotlarni ro'yxatga olishdan (ob-havo ma'lumotlarini yig'ish kabi) farq qiladi.

Real vaqt rejimidagi ishlashga erishish ko'pincha ixtisoslashgan apparat yoki operatsion tizimlarni o'z ichiga oladi. Standart ish stoli OTlari (Windows, Linux) DAQ oqimini kechiktirishi mumkin bo'lgan ko'p vazifalilik va uzilishlar tufayli qat'iy deterministik emas. Shuning uchun ko'plab tizimlar Real Vaqt Operatsion Tizimi (RTOS) yoki ajratilgan o'rnatilgan apparatdan foydalanadi. Masalan, National Instruments CompactRIO kontrollerlari yoki PLClari ma'lum halqalar (vazifalar) belgilangan oraliqlarda bajarilishini ta'minlash uchun rejalashtiruvchida yuqori ustuvorlikka ega bo'lgan real vaqt OTida ishlaydi. Bunday RTOS nodeterministik xatti-harakatlardan (tasodifiy uzoq muddatli kontekst almashishlari va h.k.) qochib, oldindan aytib bo'ladigan bajarilishni ta'minlaydi. Buferlash konsepsiyasi ham muhimdir: ma'lumotlar DAQ qurilmasidagi buferga (FIFO) yig'ilishi va keyin bloklar bo'lib protsessorga (CPU) o'tkazilishi mumkin. Buferlash uzilishlar kechikishining yoki CPU bloklanishining qisqa muddatli keskin o'sishlari ma'lumotlar yo'qolishiga olib kelmasligini ta'minlaydi; apparat buferi yostiq vazifasini o'taydi. Dasturiy ta'minot bir necha millisoniyaga kechikkan taqdirda

ham, ma'lumotlar buferda kutib turishi uchun interfeys tugunlarida yetarli buferlashni yoqish tavsiya etiladigan amaliyotdir.

Digital Data Acquisition System



Rasm 42: Raqamli ma'lumotlarni to'plash tizimi

Ba'zi DAQ apparatlari vaqt nuqtai nazaridan muhim vazifalarni bajaradigan o'rnatilgan protsessorlar yoki FPGA chiplari bilan birga keladi. Masalan, ADwin real vaqt rejimidagi DAQ tizimi kiritish/chiqarish (I/O) ga uzviy bog'langan mahalliy DSP protsessori va real vaqt OTidan foydalanib, mikrosiniyalar tartibidagi halqa vaqtlariga erishadi. Real vaqt rejimida signallarni qayta ishlashni amalga oshiradigan LabVIEW grafik dasturining misoli. Ushbu tizimlar oddiy shaxsiy kompyuterda iloji bo'lmagan mikrosiniyali jitter bilan, aytaylik, 100 kHz diskretlash boshqaruv halqasini kafolatlashi mumkin. Aslida, ular real vaqt rejimidagi yukni asosiy shaxsiy kompyuterdan olib tashlaydi. CompactRIO kabi apparat bilan National Instruments ning yondashuvi o'ta tezkor deterministik ishlov berish uchun FPGa va/yoki millisoniya diapazonidagi vazifalar uchun kontrollerda VxWorks yoki NI Linux RT OTiga ega bo'lishdir.

Yana bir asosiy jihat - real vaqt rejimida ma'lumotlarni o'tkazish qobiliyatidir. Agar siz diskka yuqori tezlikda o'nlab kanallarni yozayotgan bo'lsangiz, tizim ma'lumotlar tezligini ushlab turishi kerak. Real vaqt rejimidagi DAQlar ko'pincha oldindan ajratilgan xotiraga ega bo'ladi va ma'lumotlarni oldindan aytib bo'ladigan tarzda ko'chirish uchun DMA (to'g'ridan-to'g'ri xotiraga kirish) uzatishlaridan foydalanadi. Deterministik xatti-harakatlar chiqishni generatsiya qilishga ham tegishlidir: masalan, har 1 ms da aynan boshqaruv analog kuchlanishini ishlab chiqarish. Chiqish vaqtidagi har qanday o'zgaruvchanlik (jitter) boshqaruv

tizimining barqarorligini yomonlashtirishi mumkin (faza chegarasining pasayishi va h.k.). Shunday qilib, real vaqt rejimidagi DAQlar apparat tomonidan vaqti belgilangan halqalar hamda sinxronlashtirilgan A/R va R/A vaqtni belgilash kabi xususiyatlarni taqdim etadi.

Real vaqt tizimlari uchun kechikish va buferlash muvozanatlashgan bo'lishi kerak. Katta bufer kechikishni yuzaga keltirib chiqaradi (ma'lumotlar qayta ishlanishidan oldin buferda turadi), bufersizlik esa to'lib ketish xavfini tug'diradi. Ko'pgina tizimlar ikki tomonlama buferlash yoki ping-pong buferlaridan foydalanadi: biri to'layotganda, ikkinchisi qayta ishlanadi va bu uzluksiz oqimni ta'minlaydi. Agar qayta ishlash jarayoni yetishib ololmasa, real vaqt tizimi odatda ma'lumotlarni tashlab yuborishga yoki muddatlarni o'tkazib yuborishga majbur bo'ladi, bu esa nosozlik hisoblanadi. Shuning uchun quvvatni rejalashtirish (CPU yoki FPGA eng yomon yuklanish holati uchun yetarli zaxiraga ega bo'lishini ta'minlash) real vaqt rejimidagi DAQ yechimini loyihalashning bir qismidir.

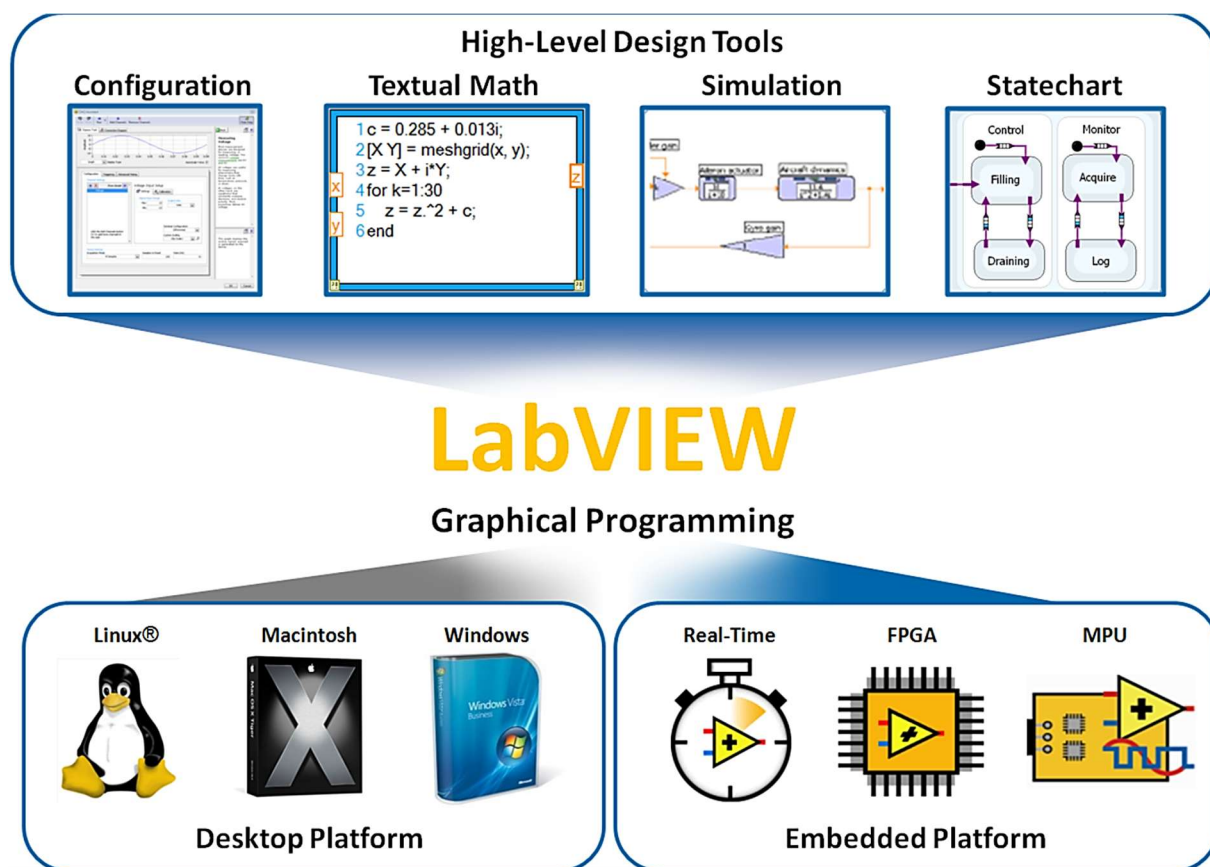
Quyosh energiyasi sohasida uzoqdagi quyosh fermasidan ma'lumotlarni markaziy SCADAg yuborishni ko'rib chiqaylik: agar u faqat monitoring bo'lsa, biroz kechikish qabul qilinadi. Ammo agar u real vaqt rejimida tarmoqni qo'llab-quvvatlasa (invertorni sozlash orqali kuchlanishni tartibga solish), unda o'lchovlar va boshqaruv signallarining deterministik, o'z vaqtida yetkazib berilishi juda muhimdir. Bunday hollarda DAQ tugunlari va kontrollerlar o'rtasida deterministik aloqa uchun EtherCAT yoki PROFINET IRT kabi protokollardan foydalanish mumkin va kontrollerlarning o'zlari RTOS ni ishga tushiradi.

Xulosa qilib aytganda, real vaqt rejimidagi DAQ tizimlari diskretlash va javob berish minimal jitter bilan belgilangan muddatlarda amalga oshishini kafolatlaydi. Ular bunga maxsus apparat, buferlash strategiyalari va real vaqt rejimida rejalashtirish orqali erishadilar. Natija - energiya sohasida qat'iy boshqaruv halqalari va tezkor himoya tizimlari uchun zarur bo'lgan, oldindan aytib bo'ladigan, takrorlanuvchi ishlashdir. Real vaqt rejimi uchun loyihalash shunchaki "Men yetarlicha tez diskretlay olamanmi?" deb o'ylashni emas, balki "Men har doim o'z vaqtida diskretlay olamanmi va reaksiya bildiray olamanmi?", ushbu ixtisoslashgan tizimlar aynan shu talabni bajarish uchun qurilgan, deb o'ylashni anglatadi.

9.3 NI LabVIEW va ma'lumotlarni yig'ish platformalari

National Instruments LabVIEW ma'lumotlarni yig'ish va boshqarish ilovalarini, ayniqsa tadqiqot, sanoat prototiplarini yaratish va energiya tizimlarini monitoring qilishda ishlab chiqish uchun keng qo'llaniladigan platformadir. LabVIEW ning o'ziga xos xususiyati uning grafik dasturlash muhitidir: muhandislar matn kodini

yo'zish o'rniga, funktsiya bloklarini (operatsiyalar, asboblari, ma'lumotlarni displeyga ko'rsatish yoki yo'zib olish va boshqalarni ifodalovchi) vizual ravishda bog'laydigan blok sxemalarni yaratadilar. Bu asbobsozlik tizimlarini tezda ishlab chiqish imkonini beradi. LabVIEW dasturi (Virtual Asbob, VI deb ataladi) blok-diagramma (mantiq) va old paneldan (GUI) iborat. Masalan, quyosh panelini monitoring qilish uchun oddiy VIn o'rnatish uchun DAQ yordamchisi (DAQ Assistant) blokini tashlash, uni AII kanalida (quyosh panelining kuchlanishi) analog kuchlanishni olish uchun sozlash va keyin uning chiqishini old paneldagi to'lqin shakli grafigi indikatoriga ulash mumkin. Blok-diagrammada bu uzluksiz yig'ish va displeyga ko'rsatishni ifodalovchi DAQ tugunidan grafik tuguniga ma'lumotlarni uzatuvchi simlar sifatida namoyon bo'ladi. LabVIEW quyi darajadagi drayver interfeysining ko'p qismini mavhumlashtiradi, kapot ostida NI-DAQmx drayverlari DAQ apparati bilan aloqa qiladi, ammo foydalanuvchi dialog oynalari yoki blok parametrlari orqali shunchaki kanallar va chastotalarni tanlaydi.



Rasm 43: LabView dasturining mavjud funksiyalari

Sanoat energiya tizimlari uchun LabVIEW ko'plab kutubxonalar va asboblari to'plamlarini taqdim etadi: masalan, signallarni qayta ishlash, PID boshqaruvi, ma'lumotlar bazalari (ro'yxatga olish uchun) va hatto quvvat elektroniği tahlili uchun asboblari to'plamlari. Keng tarqalgan foydalanish holati - quyosh stansiyasi datchiklaridan (nurlanish, modul haroratlari, inverter chiqishlari) ma'lumotlarni

uzluksiz yozib oladigan hamda real vaqt rejimida boshqaruv paneli va signallarni taqdim etadigan LabVIEW ilovasidir. Ma'lumotlarni ro'yxatga olish CSV fayliga yozish kabi oddiy yoki ma'lumotlar bazasi yoki bulutli integratsiya kabi murakkab bo'lishi mumkin. LabVIEW ma'lumotlarni vaqt belgilari bilan yozib olish uchun funksiyalarga va hatto o'rnatilgan datalog fayl formatlariga ega. LabVIEW Windows yoki real vaqt OTda (LabVIEW Real-Time bilan) ishlashi mumkinligi sababli, xuddi shu kodni daladagi mustahkam o'rnatilgan kontrollerda qo'llash mumkin.

LabVIEW ning kuchli tomonlaridan biri uning NI ning DAQ apparati bilan va undan tashqari integratsiyalashuvidir. DAQmx drayverlari orqali LabVIEW USB, PCI yoki Ethernet DAQ qurilmalari bilan oson ishlaydi, agar foydalanuvchiga maxsus boshqaruv kerak bo'lmasa, barcha vaqt va buferlashni avtomatik ravishda boshqaradi. Masalan, agar quyosh-issiqlik saqlash tankidan 32 ta termopara kanalini yig'ish uchun NI cDAQ shassisidan foydalanilsa, LabVIEW dasturi barcha kanallarni 1 Hz chastotada diskretlash va atigi bir nechta bloklar yordamida diskka yozish uchun sozlashi mumkin. LabVIEW arxitekturasi o'zining ma'lumotlar oqimi tabiati tufayli asosan ko'p tarmoqli bo'lib, bitta halqaga ma'lumotlarni yig'ishga, ikkinchisiga diskka yozishga va boshqasiga foydalanuvchi interfeysini yangilashga imkon beradi, bularning barchasi parallel ravishda amalga oshiriladi, bu esa uzluksiz monitoring tizimlari uchun idealdir.

LabVIEW, shuningdek, uzoq joylardagi quyosh fermalari uchun qimmatli bo'lgan tarmoq va masofaviy monitoringni qo'llab-quvvatlaydi. LabVIEW ning veb-nashr vositalaridan yoki yangiroq Veb-xizmatlardan foydalanib, ma'lumotlarni masofadan ko'rish uchun yupqa mijoz boshqaruv panelini yaratish mumkin. Shu bilan bir qatorda, LabVIEW SCADA tizimlari bilan integratsiya qilish uchun Modbus, OPC UA yoki REST API kabi protokollar orqali aloqa qilishi mumkin. Masalan, LabVIEW ilovasi stansiya SCADAgA invertor o'lchovlari va holatini taqdim etuvchi OPC UA serveri sifatida ishlashi va ayni paytda rezervlash uchun ma'lumotlarni mahalliy ro'yxatga olishi mumkin.

Yana bir muhim platforma xususiyati ma'lum apparatlarda (CompactRIO yoki FlexRIO kabi) NI LabVIEW FPGA bilan integratsiyalashuvidir. Bu o'ta tezkor boshqarish yoki foydalanuvchi tomonidan ma'lumotlarni maxsus qayta ishlashi uchun FPGA mantiqidan foydalanish imkonini beradi. Masalan, quyosh invertorini sinovdan o'tkazishda FPGA VI tarmoq sharoitlarini simulyatsiya qilish yoki yuqori tezlikdagi o'tkinchi hodisalarni (nosozlikni o'tkazib yuborish hodisasi kabi) mikrosiniya aniqligi bilan ushlash va so'ngra ma'lumotlarni ro'yxatga olish uchun CPUga uzatish uchun dasturlashtirilishi mumkin.

LabVIEW ga raqobatchi va qo'shimcha platformalar qatoriga ilmiy kutubxonalarga ega Python yoki ixtisoslashtirilgan ma'lumotlarni yozib olish

dasturlari (real vaqt simulyatsiyasi uchun MATLAB/Simulink yoki mustaqil dataloggerlar) kiradi. Biroq, LabVIEW o'lchov apparatlari bilan oson interfeysi va GUI ni tez yaratish tufayli o'z o'rnini topdi. Dasturiy ta'minot bo'yicha rasmiy ta'lim olmagan muhandislar ko'pincha funksional sinov yoki monitoring tizimini birgalikda drag-and-drop qilishni oson deb bilishadi.

Quyosh energiyasi ilovasini tasvirlash uchun: LabVIEW da qurilgan quyosh maydonini monitoring qilish tizimini tasavvur qiling, u piranometrlardan, qabul qiluvchilardagi termoparalardan, issiqlik o'tkazuvchi suyuqlik uchun oqim sarfi o'lchagichlaridan va quvvat blokidagi elektr hisoblagichlardan ma'lumotlarni yig'ishi mumkin. LabVIEW ushbu kirishlarni, ehtimol har biri LabVIEW Real-Time dasturini ishga tushiradigan, dalada taqsimlangan NI CompactRIOlar orqali so'rashi yoki obuna bo'lishi mumkin. Kompyuterdagi (yoki master sifatida RT kontrollerlaridan biridagi) asosiy LabVIEW ilovasi ushbu ma'lumotlarni yig'adi, uni ma'lumotlar bazasiga yozib oladi (masalan, SQL serveriga yozish uchun LabVIEW ning Database Connectivity Toolkit yordamida) va operatorlarni haroratlar, quvvat chiqishi va samaradorlikni ko'rsatadigan jonli HMI bilan ta'minlaydi. Agar biron bir parametr chegaradan chiqib ketsa, dastur signallarni yoki hatto boshqaruv harakatlarini (nasos tezligini sozlash kabi) ishga tushirishi mumkin, LabVIEW ning Control toolkit yoki oddiy mantig'i buni bajara oladi. Shu bilan birga, tizim har kuni hisobotlarni yuborish yoki masofaviy manfaatdor tomonlar uchun xulosa ma'lumotlarini bulutli xizmatga surish uchun sozlangan bo'lishi mumkin.

Energiya tizimlari ta'limi sharoitida LabVIEW asbobsozlikni o'qitish uchun laboratoriyalarda ham qo'llaniladi. Talabalar elektron yuklarni nazorat qilish va datchiklarni o'qish orqali turli yorug'lik sharoitlarida PV panellarining IV-egriliklarini chizish uchun LabVIEW dan foydalanishlari mumkin, bunday tajribalarni elektron yuk asboblari uchun (GPIB/USB boshqaruvi uchun NI-VISA orqali) va panel kuchlanishi/tok kuchi uchun DAQ uchun LabVIEW drayverlari bilan amalga oshirish ancha soddadir.

LabVIEW dan tashqari ma'lumotlarni yozib olish platformalariga zavodni boshqarish uchun ko'proq point-and-click bo'lgan sotuvchiga xos SCADA dasturlari (Wonderware, Ignition kabi) kiradi. Ammo LabVIEW ko'pincha moslashuvchan, moslashtiriladigan tizim rolini o'ynaydi, ayniqsa noyob tahlillar yoki hardware-in-loop talab qilinishi mumkin bo'lgan R&D yoki tajriba loyihalarida (masalan, LabVIEW da simulyatsiya qilingan tarmoq bilan yangi inverter dizaynini sinash).

Xulosa qilib aytganda, NI LabVIEW oson apparat interfeysini (DAQmx va asbob drayverlari orqali) asenkronlik va real vaqt rejimida ma'lumotlarni qayta ishlashga urg'u beruvchi grafik dasturlash bilan birlashtirib, quyosh energiya tizimlari uchun asbobsozlik va ma'lumotlarni yozib olishni rivojlantirish uchun yaxlit muhitni

taqdim etadi. Bitta vositada ma'lumotlarni yig'ishning backend qismini ham, foydalanuvchiga yuzlangan old tomonini ham (front end) ishlab chiqarish qobiliyati kuchli ustunlikdir. Mustahkam NI apparati yoki hatto uchinchi tomon qurilmalari bilan birgalikda LabVIEW ga asoslangan platformalar muhandislarga quyosh sohasida vizual ravshanlik va tezkor rivojlanishga urg'u berib, oddiy ro'yxatga oluvchilardan tortib, murakkab masofaviy monitoring va boshqarish tizimlarigacha bo'lgan hamma narsani amalga oshirishga imkon beradi. Quyosh stansiyalari o'sishda davom etayotgani va murakkab monitoringni talab qilayotgani sababli (ishlashni optimallashtirish, nosozliklarni aniqlash, tarmoq o'zaro ta'siri uchun), bunday moslashuvchan ma'lumotlarni yig'ish platformalari ham operatsiyalar, ham tajribalar uchun bebahodir.

10. Kalibrlash usullari va standartlar

10.1 Kalibrlash tartiblari va hujjatlashtirish

Kalibrlash — bu asbob chiqishini ma'lum (etalon) qiymat bilan solishtirib, aniqlikni aniqlash va zarur bo'lsa uni sozlash jarayonidir. ISA ta'rifiga ko'ra, kalibrlash “o'lchanadigan kattalikning ma'lum qiymatlari o'zgartirgichga beriladigan va belgilangan sharoitlarda mos chiqish ko'rsatkichlari qayd etiladigan sinov” bo'lib, mohiyatan asbobni aniqligi yuqoriroq etalon bilan solishtirish, natijalarni hujjatlashtirish jarayonida zarur sozlashlarni kiritishdan iborat. Quyosh energiyasi kontekstida (masalan, piranometr yoki quvvat o'lchagichni kalibrlashda) bu nurlanish yoki elektr chiqishi o'lchovlarining ishonchli bo'lishini ta'minlaydi.

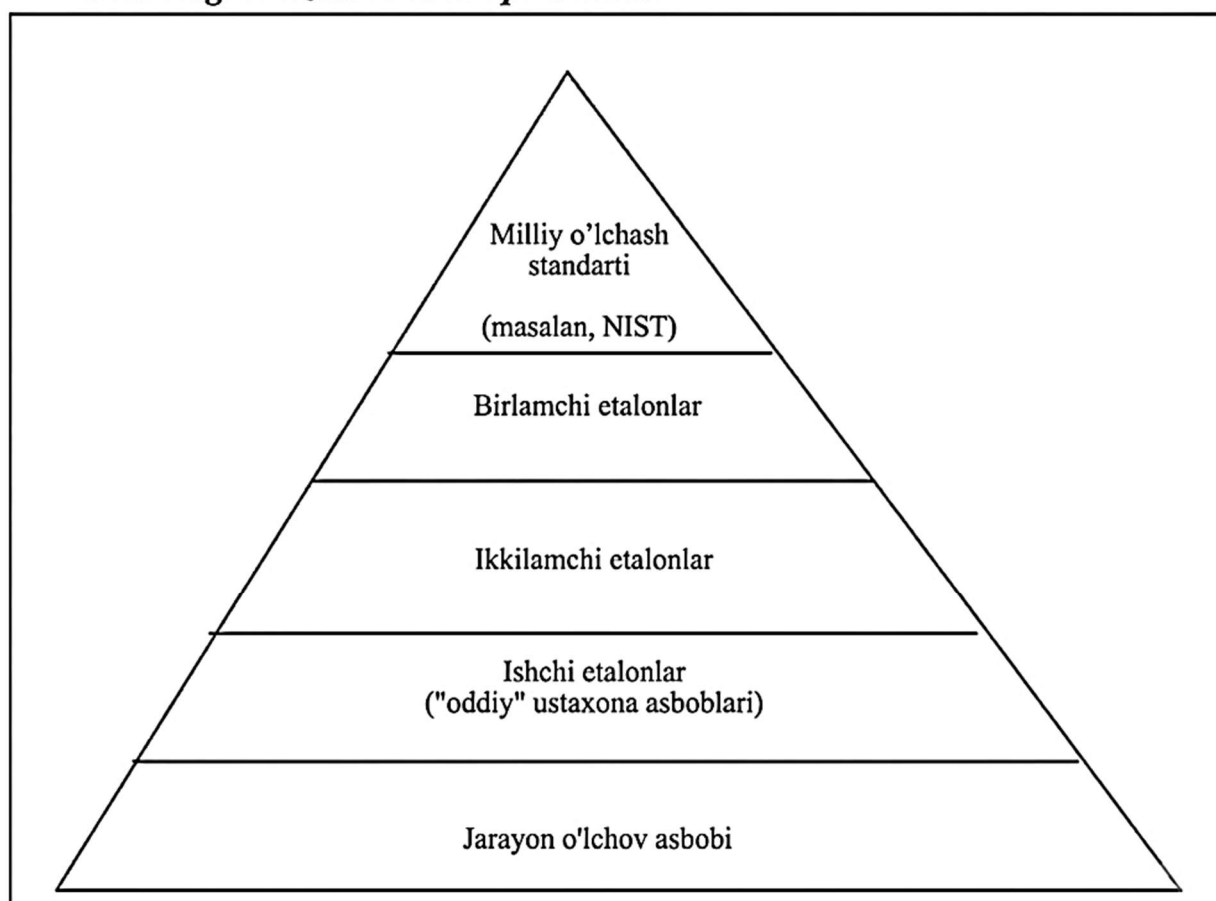
Kalibrlash tartiblari odatda tuzilmali yondashuvga amal qiladi:

1. Tayyorgarlik: Sinovdan o'tayotgan qurilmani (UUT) va aniqligi yuqoriroq bo'lgan mos etalon standart asbobni aniqlang (odatda 4:1 aniqlik nisbatida, ya'ni etalon UUT ga nisbatan $\sim 4\times$ aniqroq bo'ladi). Etalonning o'zi ham kalibrlangan va milliy standartlarga kuzatuvchan bo'lishini ta'minlang (masalan, AQShda NIST).
2. Atrof-muhit nazorati: Kalibrlashni nazorat qilinadigan muhitda tashkil qiling. Harorat va namlik kabi sharoitlarni talab etilgan kalibrlash sharoitlariga yoki asbob standartlarida ko'rsatilgan qiymatlarga moslab barqarorlashtiring. Bu, ayniqsa, harorat ta'siriga sezgir bo'lishi mumkin bo'lgan quyosh datchiklari uchun muhim.
3. Nol/Span tekshiruvi: Agar qo'llanilsa, sinov nuqtalarini berishdan oldin asbobning nol ko'rsatkichi va to'liq shkala (span) sozlamasini tekshiring. Masalan, nurlanish datchigi ustiga qorong'i qopqoq qo'yib nolga keltirilishi mumkin.
4. Ma'lum kirishlarni berish: Asbob diapazoni bo'ylab ma'lum kirish qiymatlari yoki etalon ta'sirlar qatorini qo'llang. Har bir nuqta uchun etalon asbobning qiymatini va UUT ko'rsatkichini qayd eting. Har qanday nochiziqlilikni aniqlash uchun butun diapazonni qamrab oling (masalan, shkalaning 0%, 25%, 50%, ... 100%).
5. Sozlash: Agar UUT sezilarli xatoni ko'rsatsa, mavjud bo'lgan sozlashlarni bajaring (mexanik trim, elektr potensiometr, yoki raqamli offset). Sozlashdan so'ng, xato minimallashtirilganini tasdiqlash uchun o'sha nuqtada o'lchovni qayta takrorlang. Keyin aralashuvning oldini olish uchun sozlash nuqtalarini muhrlang.

6. O'lchovlarni takrorlash: Asbob diapazoni bo'ylab kerakli aniqlikka mos kelishini ta'minlash uchun sozlashlardan keyin sinov nuqtalarini qayta bajaring ("as-left" ma'lumotlari). Agar biror nuqta hanuz tolerantlikdan tashqarida bo'lsa, qo'shimcha kalibrlash yoki ta'mirlash talab qilinishi mumkin.
7. Hujjatlashtirish: Jarayon davomida barcha natijalarni hujjatlashtiring. "as-found" ko'rsatkichlarini (sozlashdan oldin) va "as-left" ko'rsatkichlarini (sozlashdan keyin), etalon qiymatlarini, atrof-muhit sharoitlarini, sanani va kalibrlashni bajargan xodimlarni qayd eting. Bularning barchasi kalibrlash yozuvi va sertifikatiga kiritiladi.
8. Kalibrlash sertifikati: Kamida quyidagilarni o'z ichiga oladigan rasmiy sertifikat chiqaring: asbob identifikatsiyasi, kalibrlash sanasi, kalibrlash natijalari, o'lchov noaniqligi, har qanday cheklovlar yoki tuzatishlar va kalibrlash qaysi vakolat asosida bajarilgani. Ushbu hujjat Metrologik kuzatuvchanlikni va kalibrlash paytidagi asbob aniqligining dalilini ta'minlaydi.
9. Metrologik kuzatuvchanlik va tasdiqlash: Kalibrlash natijalari xalqaro yoki milliy standartlarga metrologik kuzatuvchan ekanini ta'minlang. Masalan, etalon standart NIST (National Institute of Standards and Technology) yoki boshqa milliy metrologiya laboratoriyasiga kuzatuvchanlik bo'yicha sertifikatlanganini qayd eting. Metrologik kuzatuvchanlik zanjiri yaqqol ko'rinishi kerak, masalan, dala piranometri ishchi standart radiometr bilan kalibrlangan bo'lib, u esa o'z navbatida yuqori darajadagi laboratoriyada birlamchi standartga nisbatan kalibrlangan bo'ladi. Asbobdan fundamental standartlarga bo'lgan solishtirishlar zanjiri o'lchovlarning ishonchliligini kafolatlaydi.
10. Kalibrlash oralig'i va markirovkalash: Asbob aniqligi qanchalik tez siljishi mumkinligiga qarab qayta kalibrlash oralig'ini belgilang (masalan, har yili yoki juda kritik datchiklar uchun 6 oyda). Asbobga oxirgi kalibrlash sanasi va keyingisi qachon kerakligini ko'rsatadigan kalibrlash stikeri yopishtiring. Bu oraliq ko'pincha ishlab chiqaruvchi tavsiyalari va kuzatilgan siljishga qarab belgilanadi; kalibrlash chastotasini oshirish qayta kalibrlashdan oldingi maksimal xatoni kamaytiradi.
11. Yozuvlarni boshqarish: Kalibrlash sertifikatini arxivlang va asbobning tarix jurnalini yangilang. Sanoat amaliyotida (va ISO 9001 sifat tizimlarida) barcha asboblarni uchun kalibrlash ma'lumotlar bazasi yuritiladi, bunda ularning holati va keyingi muddat ko'rsatiladi. Ushbu hujjatlar sifatni ta'minlash dasturining bir qismi bo'lib, barcha datchiklar (masalan, quyosh stansiyasi SCADA tizimidagi) ishonchli ekanini ta'minlaydi.

Hujjatlashtirish va Metrologik kuzatuvchanlik: Ishonchli kalibrlash tizimi har bir asbobning kalibrlash ma'lumotlari qayd etilishi va ularga kirish mumkin bo'lib saqlanishini talab qiladi. Kalibrlash hujjatlari odatda shaklni (ko'pincha kalibrlash hisoboti yoki dasturiy ma'lumotlar bazasida) o'z ichiga oladi; unda sana, texnik, foydalanilgan etalon uskunalar (ularning seriya raqamlari va kuzatuvchanlik ma'lumotlari bilan), atrof-muhit sharoitlari, o'lchangan qiymatlar, kiritilgan sozlashlar va asbob spesifikatsiyalarga mos kelishini tasdiqlash uchun maydonlar bo'ladi. Eng muhimi, asbobni uzluksiz kalibrlash zanjiri orqali milliy standartlarga bog'laydigan Metrologik kuzatuvchanlik bayonoti kiritiladi. Masalan, quyosh paneli sinov laboratoriyasidagi voltmeter kompaniyaning ishchi standart o'lchagichiga nisbatan kalibrlanishi mumkin, u esa akkreditatsiyalangan laboratoriya tomonidan birlamchi kuchlanish standartiga nisbatan kalibrlangan bo'ladi, hujjatlarda ushbu zanjirni isbotlash uchun sertifikat raqamlari keltiriladi.

Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi



Rasm 44: Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi

Muntazam kalibrlash hujjatlashtirilishi va ko'rib chiqishlari shunchaki byurokratik rasmiyatchilik emas, ular energiya ishlab chiqarish uchun kritik asboblari (quyosh nurlanishi datchiklari, inverter chiqish o'lchagichlari, issiqlik datchiklari kabi) ruxsat etilgan xato chegaralari doirasida ishlayotganini ta'minlaydi. Ko'plab sifat va

xavfsizlik standartlari buni talab qiladi. Masalan, tarmoqqa ulangan quyosh fermalari o'z energiya hisoblagichlarini daromad (revenue-grade) standartlariga muvofiq kalibrlashi va muvofiqlik uchun buni hujjatlashtirishi kerak.

10.2 ISO, ISA va NIST standartlari

Sanoat kalibrlash amaliyotlari izchillik va ishonchlilikni ta'minlash uchun xalqaro standartlar bilan tartibga solinadi. ISO/IEC 17025 kalibrlash va sinov laboratoriyalari uchun asosiy standart hisoblanadi. U boshqaruv amaliyotlari va texnik jihatlarini qamrab olgan holda laboratoriyalar malakasiga qo'yiladigan umumiy talablarni belgilaydi. ISO/IEC 17025:2017 ga akkreditatsiyadan o'tgan laboratoriya tegishli tartib-qoidalardan foydalanishini, o'qitilgan xodimlarga, mos uskunalarga ega ekanligini va texnik jihatdan haqiqiy kalibrlash natijalarini bera olishini ko'rsatgan bo'ladi. Ko'pgina quyosh uskunolari ishlab chiqaruvchilari va sinov laboratoriyalari o'z kalibrlashlari (masalan, piranometrlar yoki quyosh elementlari etalon modullari) xalqaro miqyosda tan olinishi uchun ISO/IEC 17025 akkreditatsiyasini olishga intilishadi. Bunday laboratoriyalar qat'iy sifat tizimlarini yuritishlari, davriy malaka sinovlarini o'tkazishlari va ular foydalanadigan barcha etalon standartlarning o'zlari ham kalibrlanganligini va metrologik kuzatuvchanligini ta'minlashlari kerak.

NIST kuzatuvchanligi

AQShda Milliy standartlar va texnologiyalar instituti (NIST) turli o'lchovlar (kuchlanish, harorat, yorug'lik intensivligi va h.k.) uchun eng yuqori darajadagi etalon standartlarni taqdim etadi. Agar asbobning kalibrlashini hujjatlar orqali NIST standartlariga bog'lash mumkin bo'lsa, u "NISTga kuzatuvchan" hisoblanadi. Metrologik kuzatuvchanlik rasmiy ravishda "uzluksiz solishtirishlar zanjiri orqali natijani tegishli standartlarga, odatda milliy yoki xalqaro standartlarga bog'lash imkonini beruvchi o'lchov natijasining xususiyati" sifatida ta'riflanadi. Amaliyotda bu shuni anglatadiki, dala asbobidan tortib yuqoriroq standartlarga bo'lgan har bir kalibrlash bosqichi yozuvlar va aniqlangan noaniqliklarga ega bo'ladi, shu sababli daladagi o'lchov aniqligi fundamental SI birliklariga bog'langan bo'ladi. Masalan, yuqori haroratli quyosh qabul qiluvchisida ishlatiladigan termopara etalon termometrغا nisbatan kalibrlanishi mumkin, u esa o'z navbatida harorat uchun NISTga kuzatuvchan bo'lgan qattiq nuqtali kataklarga ega laboratoriyada kalibrlangan bo'ladi. Ushbu uzluksiz zanjir global bir xillikni ta'minlaydi: bitta laboratoriyada o'lchangan 20 °C boshqa joyda belgilangan noaniqliklar doirasida xuddi shunday 20 °C dir.

ISO 9001 va kalibrlash

ISO 9001 (sifat menejmenti tizimlari) kalibrlash usullarini batafsil yoritmaydi, ammo u sifat jihatidan muhim jarayonlarda ishlatiladigan o'lchov asboblari kalibrlanishini va xalqaro standartlarga metrologik kuzatuvchan bo'lishini talab qiladi. U asboblarning standart usullar va belgilangan jadval asosida kalibrlanganligi to'g'risidagi hujjatlarni talab qiladi. Shuning uchun ko'plab sanoat kompaniyalari kalibrlash dasturlarini o'zlarining ISO 9001 sifat bo'yicha qo'llanmalariga kiritadilar, ko'pincha tashqi kalibrlashlar uchun ISO 17025 akkreditatsiyadan o'tgan xizmatlarga tayanadilar. Masalan, quyosh panellari ishlab chiqarish liniyasida ISO 9001 ga moslikni ta'minlash uchun ishlab chiqarishda ishlatiladigan barcha dinamometrik kalitlar, harorat kameralari va elektr sinov qurilmalari kalibrlash jadvaliga kiritiladi.

ISA standartlari

Xalqaro avtomatlashtirish jamiyati (ISA) asbobsozlik bilan bog'liq turli standartlar va tavsiya etilgan amaliyotlarni nashr etgan. Tegishli misollardan biri raqamli jarayon kompyuterlarining apparat ta'minotini sinash bo'yicha ISA-RP55.1 (1975) dir. Ushbu (hozirda bekor qilingan) tavsiya etilgan amaliyot raqamli boshqaruv tizimlarining apparat ishlashini baholash uchun asos yaratdi, bu sanoat avtomatlashtirish tizimlari uchun bugungi kunning yanada ilg'or standartlarining dastlabki o'tmishdoshi edi. ISA RP55.1 kalibrlash standarti bo'lmasa-da, sanoatda standartlashtirilgan sinov tartib-qoidalariga bo'lgan ehtiyojga misol bo'la oladi. Zamonaviy ISA standartlari (va tegishli ANSI/ISA standartlari) ko'pincha asboblarning ishlashi va kalibrlash masalalarini ko'rib chiqadi, masalan, ISA asboblarning texnik xususiyatlari shakllari (ISA-TR20) va atamashunoslik bo'yicha standartlarga ega bo'lib, ular barchaning aniqlik, diapazon va hokazolar bo'yicha bir xil ta'riflardan foydalanishini ta'minlash orqali kalibrlashga bilvosita yordam beradi. ISA ning kalibrlashga bergan lug'at ta'rifi allaqachon aytib o'tilgan va ISA ning kalibrlash bo'yicha yo'riqnoma hujjatlari (masalan, ISA kalibrlash usullari) aniqlik nisbatlari va metrologik kuzatuvchanlikning to'g'riligini ta'kidlaydi.

Shuni ta'kidlash kerakki, ATEX (portlash xavfi bo'lgan muhitlar uchun EI direktivalari) va IECEx (portlash xavfi bo'lgan muhitlarda sertifikatlash uchun IEC tizimi) kabi standartlar xavfli hududlarda ishlatiladigan asboblarning ishlashi va ularni sinashga qo'yiladigan talablarni o'z ichiga oladi. Masalan, kimyoviy zavodda (yoki gazga aylanuvchi quyosh energiyasi tizimidagi vodorod saqlash inshootida) ishlatiladigan bosim o'zgartirgichi nafaqat portlashga qarshi yoki o'z-o'zidan xavfsiz

bo'lishi kerak, balki uning xavfsizlik sertifikatlari ko'pincha ushbu muhitlarda uning to'g'ri ishlashini ta'minlash uchun ma'lum darajadagi aniqlik va muntazam kalibrlash rejimini talab qiladi.

Xulosa qilib aytganda, ISO/IEC 17025 ga moslik kalibrlashlarning texnik jihatdan to'g'ri ekanligini ta'minlaydi; ISO 9001 ga rioya qilish kalibrlash tashkiliy jarayonlarga kiritilishini ta'minlaydi; va NIST yoki boshqa milliy organlarga metrologik kuzatuvchanlik umumiy tayanch nuqtasini kafolatlaydi. Ushbu standartlar birgalikda sanoat va energetika sohalarida metrologik yaxlitlikning asosi hisoblanadi..

10.3 Asbob aniqligini tekshirish

Kalibrlashdan so'ng, asbobning haqiqiy ishlash jarayonida aniqlik talablariga javob berishini ta'minlash uchun uning ishlashi tekshirilishi kerak. Kalibrlash asbobni kalibrlash nuqtalarida sozlaydi, ammo aniqlikni tekshirish asbobning kalibrlashlar orasida va ish sharoitida o'zini qanday tutishini ko'rib chiqadi. Bu energiya ishlab chiqarish kabi yuqori mas'uliyatli muhitlarda juda muhimdir (masalan, quyosh fermasining energiya hisoblagichi yillik kalibrlashlar orasida kommunal xizmat ko'rsatish talab qiladigan tolerantliklar doirasida qolishini tekshirish).

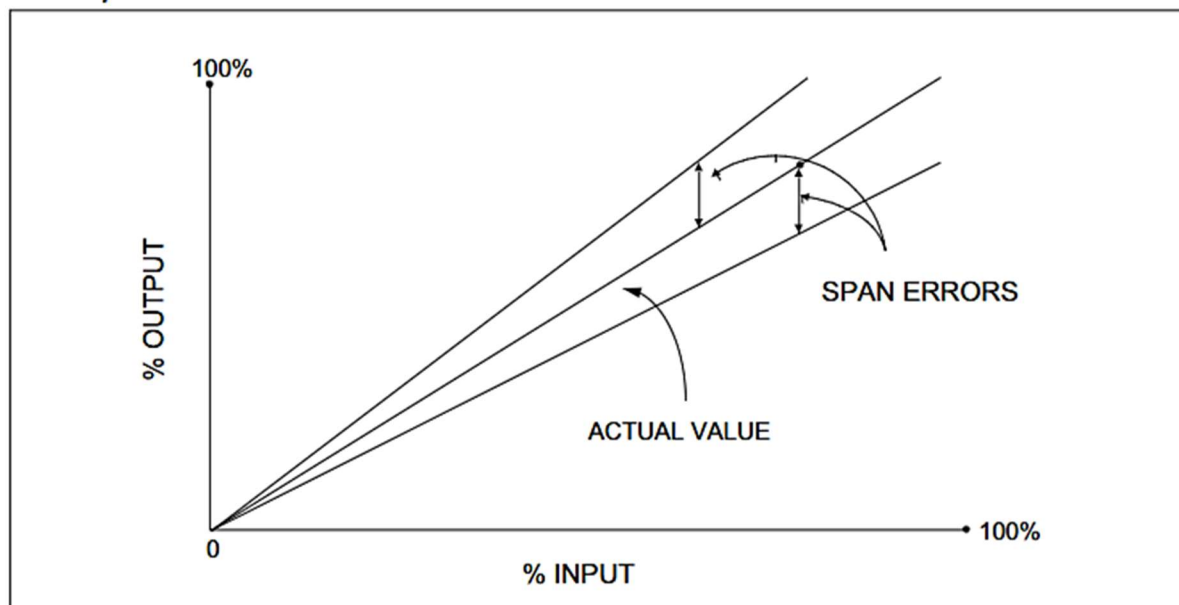
Tolerantlikni tekshirish

Tekshirish ko'pincha asbob ko'rsatkichlarining ruxsat etilgan tolerantlik doirasida qolishini tasdiqlash uchun oddiy muntazam tekshiruvlarni o'z ichiga oladi. Masalan, zavod sikl o'rtasida tekshiruv o'tkazishi mumkin: harorat o'zgartirgichining ko'rsatkichini joyidagi ko'chma etalon termometr bilan solishtirish. Agar xato hali ham ruxsat etilgan $\pm X$ °C (tolerantlik) doirasida bo'lsa, asbobning ishlashi to'g'ri deb tasdiqlanadi. Agar u tolerantlikdan oshib ketsa, bu navbatdagi rejalashtirilgan kalibrlashdan oldin ham qayta kalibrlash yoki almashtirishni talab qilishi mumkin. Aslini olganda, tekshiruv asbobning kerakli aniqlik spetsifikatsiyasiga (ko'pincha ishlab chiqaruvchining spetsifikatsiyasiga yoki qattiqroq jarayon talabiga) javob berishda davom etishini ta'minlaydi. Ko'pgina sohalar bunday oraliq tekshiruvni talab qiladi. Quyosh maydonlarida nurlanish datchiklari yoki quvvat o'lchagichlari siljib ketmaganligini zaxira datchiklarni o'zaro taqqoslash yoki ochiq kunda etalon ko'rsatkichlardan foydalanish orqali vaqti-vaqti bilan tekshirib turish mumkin.

Nazorat xaritalari (Statistik monitoring)

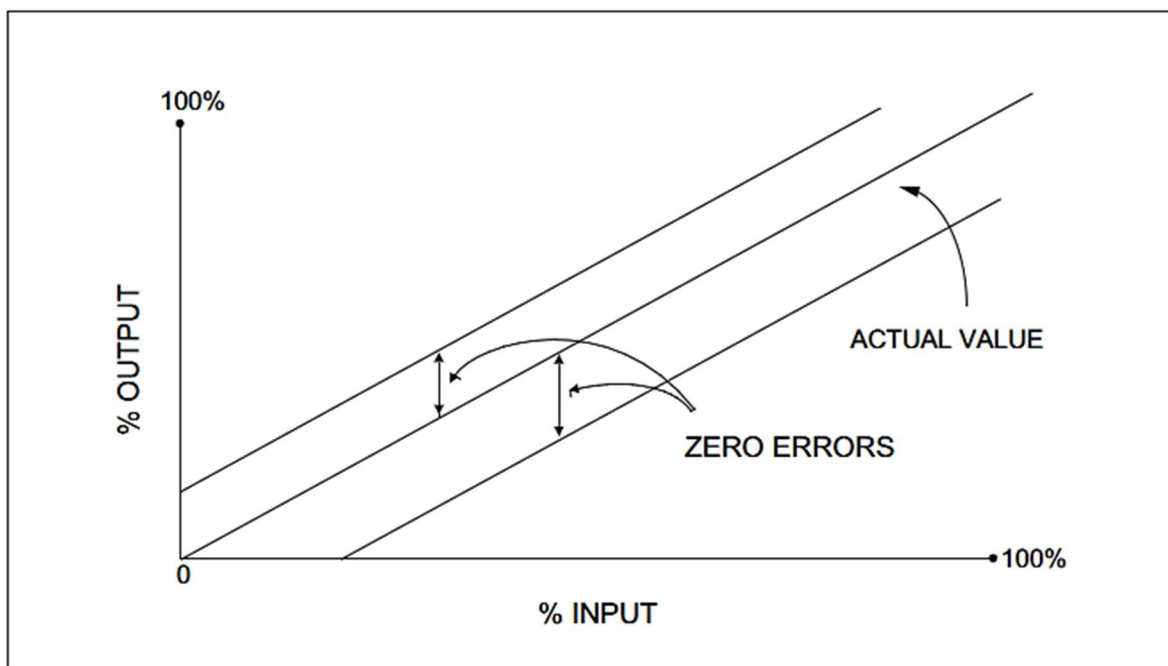
Davomiy aniqlikni tekshirishning kuchli usullaridan biri nazorat xaritalaridan foydalanishdir. Har safar asbob kalibrlanganda yoki tekshirilganda, "as-found" (sozlashdan oldingi) xatosi vaqt o'tishi bilan nazorat xaritasiga chizilishi mumkin. Bu statistik jarayonni nazorat qilish (SPC) yondashuvi siljish yoki g'ayritabiiy o'zgarishlarni aniqlashga yordam beradi. Masalan, ketma-ket kalibrlashlar bo'ylab manometrnin nol xatosi va to'liq shkala (span) xatosini kuzatish mumkin. Nazorat xaritalari nazorat chegaralariga ega bo'ladi (masalan, $\pm 2\sigma$ yoki tolerantlikka asoslangan). Agar asbob xatosi nazorat chegaralarida qolsa va tendensiyali siljish ko'rsatmasa, uning ishlashi barqaror ekanligiga ishonch hosil qilish mumkin. Agar xato tolerantlik chegarasi tomon yo'nala boshlasa yoki nazoratdan chiqsa, bu asbob siljiyotganligidan dalolat beradi hamda tez-tez kalibrlashni yoki nosozlikni aniqlashga qaratilgan texnik xizmatni talab qilishi mumkin. Har bir muhim asbob uchun Shewhart nazorat xaritalarini yuritish laboratoriyalar uchun amaliy ma'lumotlar asosida kalibrlash oraliqlarini asoslash va ehtimol uzaytirish uchun eng yaxshi amaliyot hisoblanadi. Masalan, agar bir nechta kalibrlashlar davomida quyosh nurlanishi datchigi doimo etalonga nisbatan $\pm 0.5\%$ ichida ($\pm 2\%$ spetsifikatsiya ichida juda ishonchli) natija bersa, zavod uni kamroq tekshirishni asoslashi mumkin, beqarorlikni ko'rsatadigan datchik esa ko'proq e'tibor talab qiladi.

Span Error



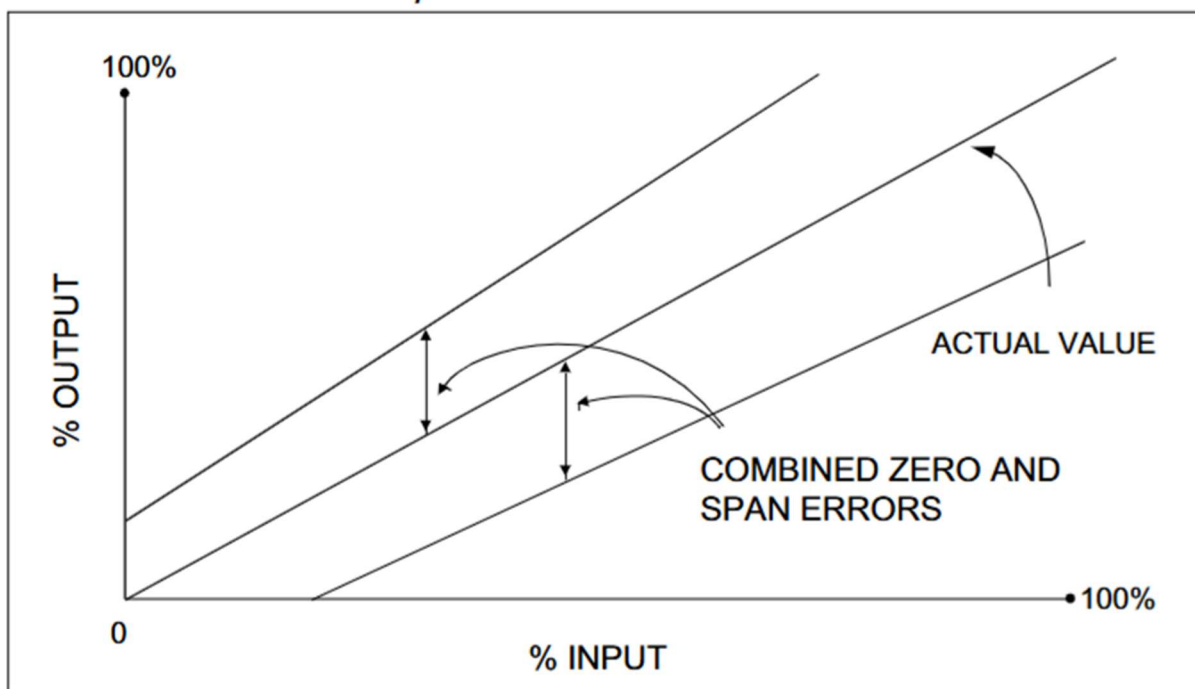
Rasm 45: Asbob aniqligini tekshirish - To'liq shkala (Span) xatosi

Zero Error



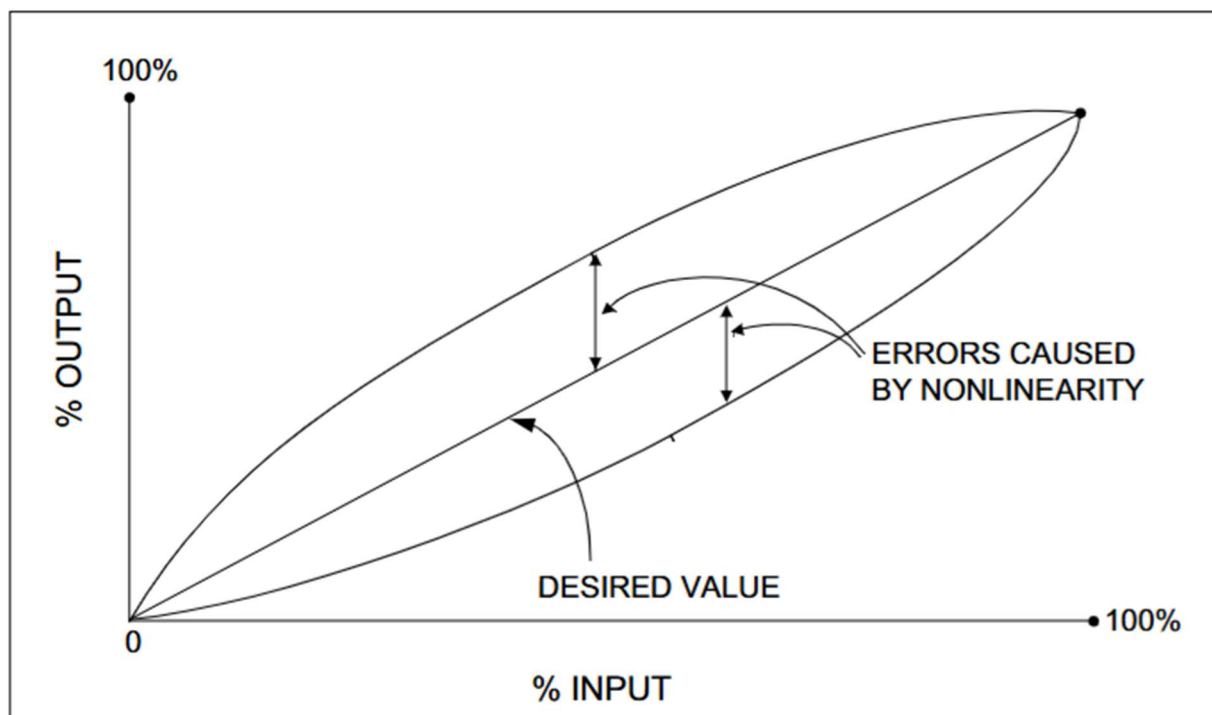
Rasm 46: Asbob aniqligini tekshirish - Nol xatosi

Combined Zero and Span Error



Rasm 47: Asbob aniqligini tekshirish - Birlashgan Nol va To'liq shkala (Span) xatosi

Linearization Error



Rasm 48: Asbob aniqligini tekshirish - Chiziqlilashtirish (Linearization) xatosi

Ishlash samaradorligini solishtirma baholash (Performance benchmarking)

Nuqtali tekshiruvlardan tashqari, ba'zi asboblarda vaqti-vaqti bilan butun asbob tizimi spetsifikatsiya doirasida ishlashini ta'minlash uchun kompleks baholash bo'lgan ishlash samaradorligini solishtirma baholash sinovlaridan o'tadi. Ishlash samaradorligini solishtirma baholash asbobni barcha funksiyalar va diapazonlarni qamrab oluvchi bir qator sinovlardan o'tkazishni, ya'ni aslini olganda kengaytirilgan tekshiruvni o'z ichiga olishi mumkin. Masalan, ma'lumotlarni qayd qiluvchi qurilma (data logger) uning analog kirish aniqligi, ro'yxatga olish oralig'i vaqti, xotira yaxlitligi va aloqasi bo'yicha funksional sinovdan o'tkazilishi mumkin. Ishlab chiqaruvchilarda ko'pincha ishlashni tekshirish bo'yicha aniq tartib-qoidalar mavjud bo'ladi; masalan, ko'p funksiyali kalibrator har bir chiqish diapazonini tashqi standartga nisbatan sinash uchun tekshirish tartibiga ega bo'lishi mumkin. Ishlashni tekshirish asbobni faqat har bir muhim spetsifikatsiya qondirilsagina "o'tkazadi". Aslida bu asbob sog'lig'i uchun to'liq hisobot kartasidir. Bitta sinov qo'llanmasiga ko'ra, ishlashni tekshirish haqiqiy ishlashni har bir spetsifikatsiya bo'yicha o'lchash va u chop etilgan chegaralariga javob berishda davom etishini ta'minlash uchun qurilmaga xos bo'lgan kompleks sinovlar to'plamini amalga oshiradi. Amaliyotda bu faqat bitta nuqtadagi aniqlikni emas, balki chiziqlilik, gisterezis, javob vaqti va h.k.

ni o'lchashni anglatishi mumkin. Solishtirma baholash quyosh fermalaridagi quvvat analizatorlari yoki atrof-muhit monitoringi stansiyalari kabi murakkab uskunalari uchun keng tarqalgan bo'lib, masalan, stansiyaning turli datchiklari (quyosh nurlanishi, shamol tezligi, harorat) va ma'lumotlarni uzatish 24 soat davomida birgalikda to'g'ri ishlashini tekshirishingiz mumkin.

Dala sharoitidagi muntazam tekshiruvlar

Kundalik ishonchni ta'minlash uchun ko'plab sanoat tizimlari zaxira o'lchovlar yoki etalon solishtirishlarni amalga oshiradi. Ikkita mustaqil datchik bir xil miqdorni o'lchashi mumkin (masalan, issiqlik almashtirgichdagi ikkita termopara); operatorlar ularning ko'rsatkichlari ma'lum bir oraliqda mos kelishini uzluksiz kuzatib boradilar. Har qanday og'ish tekshiruvga sabab bo'ladi. Bu uzluksiz tekshirishning bir ko'rinishidir. Quyosh stansiyalarida harorat yoki kuchlanishni sezishdagi zaxiralangan tizim, xuddi shunday, agar bitta asbob adashsa, darhol signallarni taqdim etishi mumkin. Bundan tashqari, asbob chiqishlari boshqaruv halqalariga uzatiladigan boshqaruv tizimini tekshirish (validatsiya) ba'zan muammolarni ochib berishi mumkin (masalan, agar nurlanish datchigi past ko'rsatsa, zavodning chiqishi bilan kutilayotgan ko'rsatkich o'rtasida farq yuzaga kelishi va bu datchikni tekshirishga turtki bo'lishi mumkin).

Xulosa qilib aytganda, asbob aniqligini tekshirish rejalashtirilgan sinovlar (kalibrlash, oraliq tekshiruvlar) va uzluksiz monitoringni (nazorat xaritalari, solishtirishlar) birlashtirib, kalibrlashlar orasida asboblarning ishonchli qolishini ta'minlaydi. Ushbu doimiy hushyorlik sanoat standartlariga muvofiqlik va sifatni ta'minlashning kalitidir. Bu siljish yoki shikastlanishni erta aniqlashga yordam beradi. Energiya tizimlaridagi muhim asboblari uchun bunday tekshirish ham ishlash unumdorligini, ham xavfsizlikni himoya qiladi, masalan, himoya relelarining to'g'ri tok kuchida o'chishini yoki akkumulyatorlar batareyasining vodorod datchigi har qanday xavfli to'planishni aniq ilg'ashini ta'minlaydi.

Savol Javoblar - Kalibrlash va tekshirish:

- *1-savol: Metrologik kuzatuvchanlik va natijalar ravshanligini ta'minlash uchun kalibrlash sertifikatiga qanday asosiy ma'lumotlar kiritilishi kerak?*
- *2-savol: Nima uchun asbobning kalibrlash natijalari nazorat xaritasini yuritish foydali va bu vaqt o'tishi bilan asbobning ishlashi haqida nimalarni aytib berishi mumkin?*

11. Raqamli asbobsozlik va ma'lumotlarni yozib olish

11.1 Raqamli datchiklar va mikrokontrollerga asoslangan yozib olishdan foydalanish

Raqamli datchiklar

Raqamli asbobsozlik va ma'lumotlarni yozib olish

11.1 Raqamli datchiklar va mikrokontrollerga asoslangan yozib olishdan foydalanish

Raqamli datchiklar

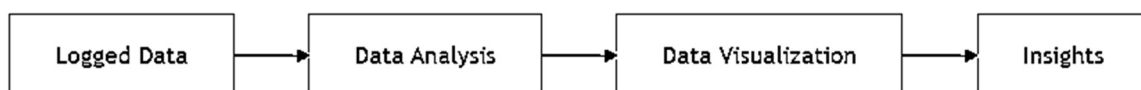
Analog datchiklardan (uzluksiz kuchlanish yoki tok kuchini chiqaruvchi) farqli o'laroq, raqamli datchiklar o'lchovlarni raqamli formatda (ikkilik ma'lumotlar) chiqarish uchun o'rnatilgan elektronikani o'z ichiga oladi. Ular ko'pincha I²C, SPI yoki 1-Wire kabi ketma-ket protokollar orqali aloqa qiladi. Ushbu protokollar datchik ma'lumotlarini mikrokontrollerlar tomonidan bevosita raqamli qiymatlar sifatida o'qish imkonini beradi va analog shovqin kabi xato manbalarini yo'q qiladi. Masalan, raqamli harorat datchigi haroratni ichki sifatida ikkilik qiymatga aylantirishi va termoparaning shovqinga moyil millivolt signaliga tayanish o'rniga uni I²C shinasini orqali ro'yxatga oluvchiga (logger) yuborishi mumkin.

I²C (Inter-Integrated Circuit): I²C ikki simli sinxron shina (bitta ma'lumot liniyasi SDA, bitta soat liniyasi SCL) bo'lib, bir nechta datchiklar (qullar - slaves) bitta liniyada boshqaruvchi (master) (masalan, mikrokontroller) bilan aloqa qilish imkonini beradi. U bir nechta datchiklarni bog'lash uchun keng qo'llaniladi, chunki har bir qurilma manzilga ega va ular shinani muvofiqlashtirilgan tarzda baham ko'rishadi. I²C nisbatan o'rtacha tezlikka ega (yuzlab kbit/s, tezkor rejimlarda bir necha Mbit/s gacha) va atrof-muhit datchiklari, ADC modullari, EEPROMlar va boshqalar uchun yaxshi ishlaydi. Quyosh massivini monitoring qilish tizimida simlarni minimallashtirish uchun turli nuqtalardagi harorat/namlik datchiklarini bitta kontrollerga ulash uchun I²C dan foydalanish mumkin. U o'zining soddaligi va o'nlab qurilmalar uchun faqat ikkita asosiy liniya kerak bo'lishi bilan qadrlanadi.

SPI (Serial Peripheral Interface): SPI bu ma'lumotlarni kiritish, ma'lumotlarni chiqarish va soat uchun alohida liniyalari, shuningdek har bir qurilma uchun individual chip tanlash liniyalariga ega bo'lgan yuqori tezlikdagi sinxron protokoldir.

Ko'pincha tezroq diskretlash yoki ma'lumotlarni uzatish tezligi yuqori bo'lganda qo'llaniladi. Masalan, SPI SD xotira kartasi modullari (ma'lumotlarni yozib olish uchun) yoki yuqori tezlikdagi ADClar uchun keng tarqalgan. SPI I²C ga qaraganda ancha yuqori tezlikka erisha oladi (o'nlab MHz soat tezligi), bu uni tezkor jarayonlarni real vaqt rejimida yozib olish (invertorning chiqish to'lqin shakli yoki yuqori chastotali tebranish datchigini diskretlash kabi) uchun mos qiladi. Buning evaziga u ko'proq simlardan foydalanadi va odatda bitta boshqaruvchi faqat cheklangan miqdordagi qullar bilan bevosita aloqa qila oladi (har biriga chip tanlash liniyasi yoki shina arbitri kerak). Raqamli asbobsozlikda SPI quyosh paneli tizmasi kuchlanishini o'lchaydigan yuqori ajrata olish qobiliyatiga ega ADC dan ma'lumotlarni real vaqtda tahlil qilish uchun mikrokontrollerga uzatishda ishlatilishi mumkin.

1-Wire: 1-Wire protokoli (Dallas/Maxim tomonidan ishlab chiqilgan) ham quvvat, ham qurilmalar bilan aloqa qilish uchun asosan bitta ma'lumot liniyasidan (plyus yer) foydalanadigan minimalist interfeysdir. 1-Wire qurilmalari, masalan mashhur DS18B20 raqamli termometri, ma'lumotlar liniyasidan tekin quvvatlanadi va past tezlikda (~16 kbps) aloqa qiladi. Afzalligi - juda oddiy sim yotqizish, siz bir liniyada ancha uzoq masofalarga ko'plab qurilmalarni zanjir qilib ulashingiz mumkin. Bu ko'pincha quyosh issiqlik saqlash tankidagi yoki quvur liniyasi bo'ylab ko'plab nuqtalarni monitoring qilish kabi taqsimlangan haroratni sezishda qo'llaniladi, bu yerda har bir datchikning raqamli ko'rsatkichi bitta umumiy kabel orqali yuboriladi. Ma'lumotlarni uzatish tezligi va o'tkazuvchanligi I²C/SPI ga qaraganda ancha past, lekin faqat har bir necha soniya yoki daqiqada hisobot berishi kerak bo'lgan datchiklar uchun 1-Wire juda samarali va tejankordir.

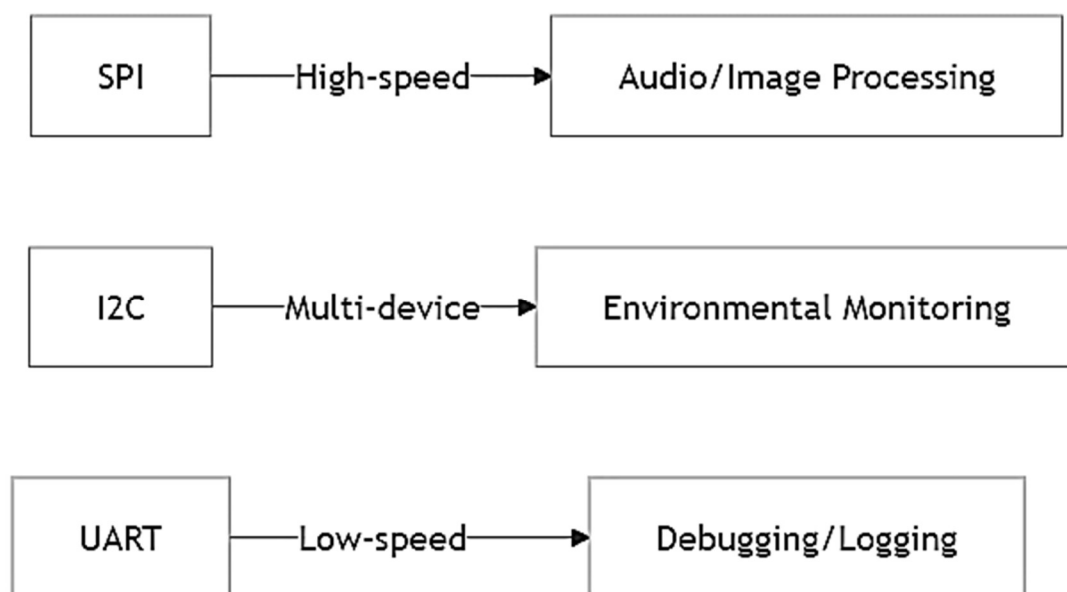


Rasm 49: To'plangan ma'lumotlarni tahlil qilish va tushunish

Raqamli datchiklarning afzalliklari

Raqamli chiqish datchiklari ko'p hollarda yuqori aniqlik va ishonchlilikni ta'minlaydi, chunki signal analog shovqin va kuchlanish tushishi muammolariga kamroq moyil bo'ladi. Raqamli datchikning chiqish bitlari raqamli aloqa ishlayotgan ekan butun yetib boradi, analog datchikning kichik kuchlanishi esa uzun kabel orqali elektromagnit xalaqitlar tufayli buzilishi mumkin. Raqamli datchiklar zamonaviy boshqaruv tizimlari bilan ham oson birlashadi, masalan, ular kontrollerda analog-

raqamli o'zgartirgich (ADC) modullarini talab qilmasdan bevosita mikrokontroller kiritish/chiqarish (I/O) yoki sanoat tarmoqlariga ulanishi mumkin. Ko'pgina raqamli datchiklar holat bayroqlari yoki o'z-o'zini tashxislash kabi qo'shimcha ma'lumotlarni ham taqdim etishi mumkin. Masalan, aqlli bosim o'zgartirgichi kalibrlash diapazonidan tashqarida ekanligini yoki uning ichki o'z-o'zini sinashi muvaffaqiyatsiz bo'lganligini aytib berishi mumkin. Ular ko'pincha o'rnatilgan kalibrlashga (xotirada saqlangan zavod kalibrlash o'zgarmaslari) ega bo'ladi, bu esa o'rnatishni osonlashtiradi, asosiy qurilma xom signallarni emas, balki allaqachon kalibrlangan qiymatlarni (masalan, muhandislik birliklarida bosim ko'rsatkichini) o'qiydi. Bundan tashqari, raqamli signallar signalning aslligini deyarli yo'qotmasdan uzoq masofalarga uzatilishi mumkin; ular yo o'tadi yoki yo'q, xatolarni tekshirishdan (tekshirish summolari kabi) foydalanish mumkin. Bu siz datchikni quyosh maydoniga joylashtirishingiz va analog siljish yoki liniya qarshiligi ko'rsatkichni buzib yuborishidan xavotirlanmasdan markaziy yozib oluvchiga raqamli kabel yoki simsiz aloqani o'tkazishingiz mumkinligini anglatadi. Umuman olganda, bir sanoat avtomatlashtirish manbasi ta'kidlaganidek, raqamli datchiklar "yuqoriroq aniqlik va ishonchlilikni taqdim etadi, raqamli signallar shovqin va xalaqitlarga kamroq moyil bo'lib, barqaror ishlashni ta'minlaydi". Ular PLC va IoT tizimlari bilan osonroq integratsiyalashadi, kalibrlash ba'zan raqamli interfeys orqali masofadan turib amalga oshirilishi yoki tekshirilishi mumkinligi sababli texnik xizmat ko'rsatishni kamaytirishi mumkin. (Aytish joizki, analog datchiklar soddaligi va o'ta yuqori ajrata olish qobiliyatiga bo'lgan ehtiyojlar uchun hali ham o'z o'rniga ega, ammo tendensiya raqamli tomonga qarab bormoqda.)



Rasm 50: Raqamli protokollar va tavsiya etilgan ilovalar

Mikrokontrollerga asoslangan yozib olish

Arduino (AVR arxitekturasini), STM32 (32 bitli ARM), ESP32 (simsiz aloqaga ega ikki yadroli) kabi mikrokontrollerlar (MCUs) ko'plab zamonaviy ma'lumotlarni yozib olish tizimlarining miyasi bo'lib xizmat qiladi. Ular raqamli datchiklar bilan bog'lanadi, ma'lumotlarni diskretlaydi, vaqt belgisini qo'yadi va uni saqlaydi yoki uzatadi. Real vaqt rejimida yozib olish uchun mikrokontrollerlar halqada yoki uzilishlar orqali vazifalarni bajaradi: datchik qiymatlarini o'qish (I²C, SPI, ADC va boshqalar orqali), ehtimol ularni qayta ishlash yoki o'rtachalashtirish va keyin ularni xotiraga yozish yoki oldinga yuborish.

Misol: Arduino Uno har soniyada bir guruh datchiklarni (aytaylik, quyosh paneli massivi atrofidagi harorat datchiklari va chiqish uchun tok kuchi datchigi) so'rash uchun o'zining I²C shinasidan foydalanishi mumkin. Keyin u ushbu ko'rsatkichlarni vaqt belgilari bilan birga CSV formatida SD kartaga (ko'pincha SPI interfeysi orqali) yozadi yoki ularni seriyali port/USB orqali shaxsiy kompyuterga yuboradi. Arduino kodi (sketch) bu o'qishlarni rejalashtirishni va ma'lumotlarning to'g'ri formatlanishini ta'minlashni boshqaradi. Mikrokontrollerning o'rnatilgan ADC si analog datchiklarni (agar mavjud bo'lsa) o'qishi mumkin, ammo raqamli datchiklar ta'riflanganidek bu ish yukini olib tashlaydi.

Real vaqt rejimidagi cheklovlar: Mikrokontrollerlar cheklangan tezlik va ko'p vazifalarni bajarish qobiliyatiga ega (agar RTOS ishlamasa). Shunday qilib, ma'lumotlarni yo'qotmasdan real vaqt rejimida yozib olishga erishish uchun ehtiyotkorlik bilan dizayn kerak. Usullar tezkor hodisalar uchun uzilishlar bilan boshqariladigan ma'lumotlarni ushlashni, ma'lumotlarni vaqtincha saqlash uchun halqali buferlarni va yuqori tezlikdagi periferik qurilmalar uchun to'g'ridan-to'g'ri xotiraga kirishni (DMA) o'z ichiga oladi. Quyosh stansiyasining ma'lumotlarni qayd qiluvchi qurilmasida (data logger) talab qilinadigan diskretlash chastotasi odatda oddiy (masalan, atrof-muhit ma'lumotlari uchun soniyasiga bitta namuna), bu tipik MCUs tomonidan osonlik bilan hal qilinadi. Ammo inverter to'lqin shaklini monitoring qilish kabi narsalar uchun (ehtimol kHz da diskretlash) kuchliroq MCU yoki buferlashga ega bo'lgan maxsus ADC ishlatilishi mumkin.

Arduino, STM32 va ESP32: Bular ma'lum bir spektrni ifodalaydi. Arduinolar (ATmega328P bilan Uno/Nano kabi) 16 MHz da ishlaydigan, cheklangan RAMga ega, oddiy ro'yxatga olish (bir nechta datchiklar, soniyasiga o'nlab o'qishlar) uchun yetarli bo'lgan 8 bitli MCU lardir. STM32 32 bitli ARM Cortex MCU lardir; ular turli xil ishlash diapazonlarida keladi va ilg'or xususiyatlarni (ko'plab taymerlar, ADC kanallari, aloqa interfeyslari) taklif qiladi, murakkabroq yozib olish va

boshqarish uchun, masalan, o'nlab datchik kanallarini bir vaqtning o'zida yozib olish yoki mahalliy hisoblashlarni (kuchlanish/tok kuchi ko'rsatkichlaridan quvvatni hisoblash kabi) bajarish uchun yaxshi. ESP32 o'rnatilgan Wi-Fi va Bluetooth ni o'z ichiga oladi, bu uni simsiz ma'lumotlarni yozib olish va IoT ilovalari uchun ideal qiladi, masalan, quyosh panelidagi ESP32 ga asoslangan ro'yxatga oluvchi datchiklarni o'qishi va ma'lumotlarni Wi-Fi orqali to'g'ridan-to'g'ri bulutli serverga e'lon qilishi mumkin. ESP32 ma'lumotlarni mahalliy tarzda ro'yxatga olishi va shuningdek ularni masofadan uzatishi, mahalliy datchiklarni internetga bog'lashi mumkin.

Misol - Quyosh IoT tizimi:

Mikrokontroller (ESP32) quyosh panelining chiqishini o'lchaydigan kuchlanish datchigi va tok kuchi datchigini o'qiydi. Bular raqamli datchiklar yoki I²C orqali ulangan ADClardir. Keyin ESP32 panel ID si, kuchlanish, tok kuchi va ehtimol hisoblangan quvvat bilan ma'lumotlar paketini tayyorlaydi. U vaqt belgisini qo'yadi va uni kichik flesh buferda saqlaydi. Bir vaqtning o'zida, u mahalliy shlyuz yoki routerga Wi-Fi orqali ulanadi va har daqiqada ma'lumotlarni uzatadi (MQTT yoki HTTP yordamida). Agar ulanish uzilib qolsa, u ma'lumotlarni SD kartaga saqlashi mumkin (zaxira mahalliy xotira) va keyinroq yuklashi mumkin. Bunday tizim quyosh ishlashini real vaqt rejimida qayd etishni ta'minlaydi va operatorlarni muammolar haqida darhol ogohlantirishi mumkin.

Mikrokontrollerlar taqsimlangan yozib olishni amalga oshirishga imkon beradi: uzoq analog simlari bo'lgan bitta markaziy yozib oluvchi o'rninga siz o'lchash nuqtalari yaqinida (masalan, har bir quyosh paneli tizmasi yoki zavodning har bir qismida) ko'plab kichik MCU ga asoslangan ro'yxatga oluvchilarni o'rnatishingiz mumkin, ular ma'lumotlarni mahalliy darajada raqamlashtiradi va yig'adi, so'ngra markaziy tizimga raqamli tarzda yuboradi. Bu signal sifati va miqyoslanishni yaxshilaydi.

Va nihoyat, raqamli asbobsozlik ko'pincha turli birliklardagi ma'lumotlarni o'zaro bog'lash uchun real vaqt soatlari (RTC) yoki GPS vaqtidan foydalangan holda ro'yxatga olish uchun vaqtni sinxronlashtirishni o'z ichiga oladi (bu katta quyosh fermalarida muhim, u yerda siz turli bo'limlardagi ma'lumotlarni solishtirishingiz mumkin). Zamonaviy MCU lar bu maqsadda RTC chiplari yoki tarmoq vaqt xizmatlari bilan bog'lanishi mumkin.

11.2 SCADA va bulutli ro'yxatga olish bilan integratsiya

Raqamli asbobsozlik alohida yashamaydi; u odatda kattaroq ma'lumotlar ekotizimining bir qismidir. Sanoatdagi SCADA (Nazorat qilish va ma'lumotlarni

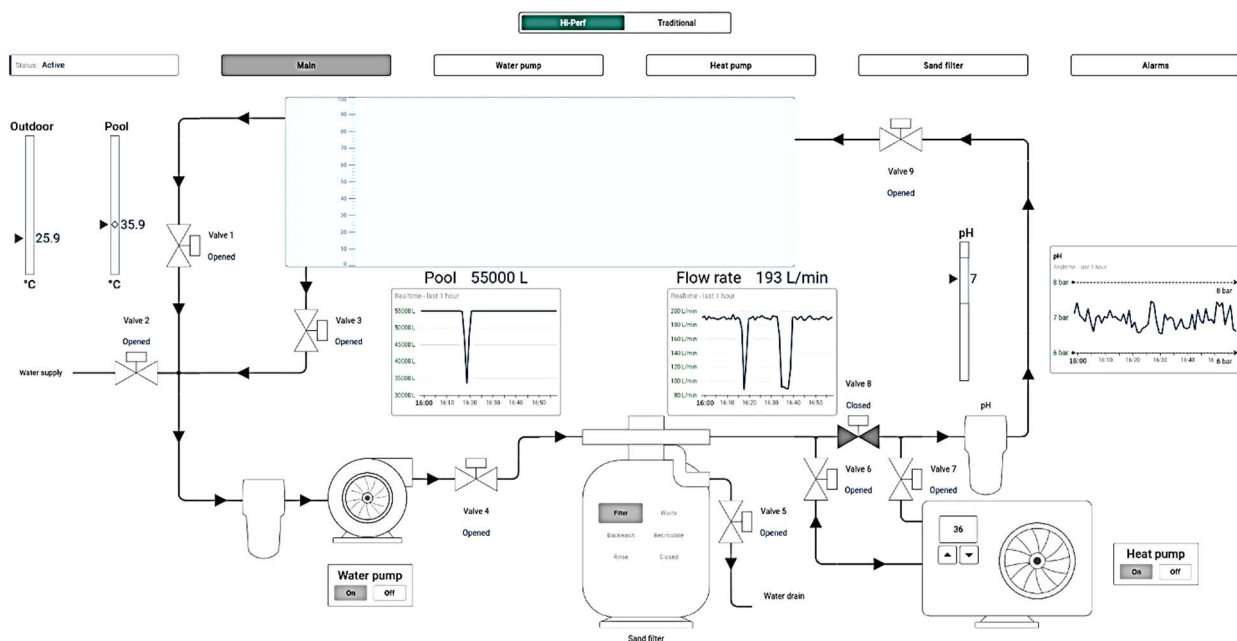
yig'ish) tizimlari dala qurilmalaridan (datchiklar, aktuatorlar, kontrollerlar) ma'lumotlarni yig'adi va operatorlar uchun taqdim etadi, shu bilan birga ko'pincha yuqori darajadagi ilovalar yoki bulutli xizmatlar bilan bog'lanadi. Mikrokontrollerga asoslangan datchiklarni yoki raqamli ma'lumotlar oqimlarini SCADA va bulutli platformalarga integratsiyalash standartlashtirilgan aloqa protokollari hamda shlyuz arxitekturalarini o'z ichiga oladi.

SCADA ga ulanish

An'anaviy SCADA sanoat aloqa protokollari yordamida dala asboblari ulanadi. Keng tarqalgan misollardan biri Modbus - bu sanoatda keng qo'llaniladigan ochiq seriyali yoki TCP/IP protokoli. Raqamli datchik yoki mikrokontrollerni o'z ko'rsatkichlarini registrlarda ochib beruvchi Modbus qurilmasi (qul - slave) sifatida sozlash mumkin. Masalan, bir nechta datchikli Arduino RS-485 tarmog'ida Modbus RTU quli sifatida harakat qilishi mumkin; SCADA RTU yoki PLC qiymatlarni o'qish uchun uni so'raydi. Ko'pgina zamonaviy datchiklar hatto Modbus/TCP yoki Modbus/RTU o'rnatilgan holda keladi. OPC UA (OPC yagona arxitekturasini) - bu ba'zi raqamli qurilmalar to'g'ridan-to'g'ri SCADA integratsiyasi uchun qo'llab-quvvatlaydigan yana bir zamonaviy protokol bo'lib, u murakkabroq, ammo tuzilmali ma'lumotlarga ruxsat beradi va Sanoat 4.0 uchun mo'ljallangan. Eng asosiysi, SCADA dala qurilmalaridan tuzilmali, ishonchli aloqani kutadi.

Agar kimdadir mikrokontrollerga asoslangan simsiz datchiklar tarmog'i bo'lsa (IoT uslubida), ko'pincha SCADA ga ko'prik o'rnatish uchun IoT shlyuzidan foydalaniladi. Shlyuz simsiz datchiklardan MQTT yoki sotuvchiga xos protokol orqali ma'lumotlarni yig'ishi, so'ngra ularni SCADA ga, aytaylik, OPC UA tugunlari yoki Modbus xaritasi orqali taqdim etishi mumkin. Sanoat IoT platformasi misoliga ko'ra, ThingsBoard'ning IoT Gateway Modbus, OPC-UA, BACnet va boshqalarni qo'llab-quvvatlaydigan hamda ma'lumotlarning SCADA foydalanishi uchun real vaqt rejimida yig'ilishini ta'minlab, eski protokollar va zamonaviy IoT oqimlari o'rtasida ko'prik yaratishi mumkin. Shlyuz, shuningdek, mahalliy buferlash va protokollarni konversiya qilishni amalga oshirishi mumkin, bu esa bulut aloqasi

uzilib qolgan taqdirda ham u tiklanganda saytdagi SCADA tizimida eng so'nggi ma'lumotlar bo'lishini kafolatlaydi.



Rasm 51: SCADA namuna (manba: thingsboard.io)

Quyosh stansiyasi SCADA kontekstida: har bir inverter yoki birlashtiruvchi qutida panellar kuchlanishini, tok kuchlarini va boshqalarni yig'uvchi kichik mikrokontroller borligini tasavvur qiling. Bularning barchasi Modbus orqali markaziy SCADA PLCga uzatilishi mumkin. SCADA dasturi (boshqaruv xonasidagi HMI kabi) bu qiymatlarni so'raydi, har bir bo'limning real vaqtdagi holatini ko'rsatadi va buyruqlar berishi mumkin (kuzatuvchilarni ishga tushirish yoki ajratuvchi kalitlarni uzish kabi). Modbus bu yerda o'zining soddaligi uchun keng tarqalgan. Haqiqatan ham, zavod maydonchasidagi PLClar va RTUlar bilan integratsiya qilish uchun real vaqt rejimida so'rov yuboruvchi Modbus kabi protokollarni qo'llab-quvvatlash muhimdir.

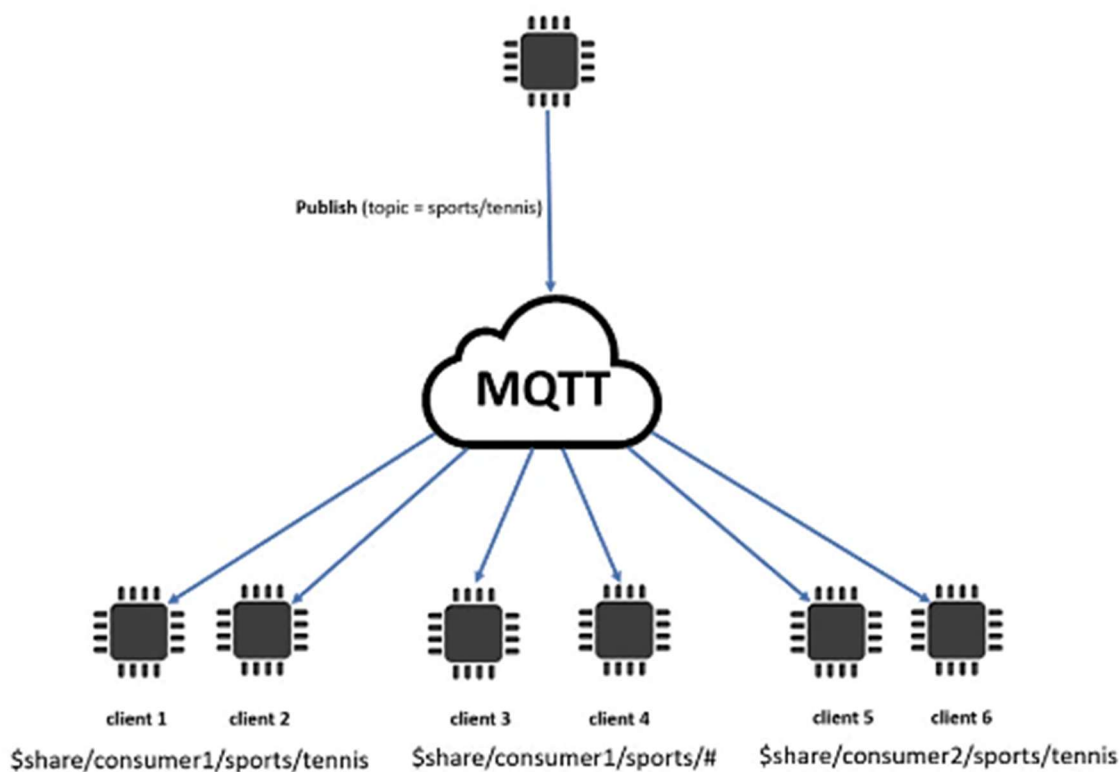
MQTT va Bulutli integratsiya

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) bulutli tizimlarga ma'lumotlarni yetkazib berish bo'yicha yetakchi protokol sifatida paydo bo'ldi. Bu IoT qurilmalari uchun ideal bo'lgan yengil vaznli nashr etish/obuna bo'lish protokoli. Qurilmalar (nashriyotchilar) o'z ma'lumotlarini "mavzular" sifatida MQTT brokeriga yuboradilar va shu mavzuga qiziqqan har qanday mijoz (obunachi) xabarni oladi. AWS IoT Core kabi bulutli xizmatlar MQTT dan ko'p foydalanadi; AWS IoT asosan qo'shimcha xavfsizlik va boshqa AWS xizmatlari bilan integratsiyalangan MQTT broker xizmatidir. MQTT past o'tkazish qobiliyati va yuqori kechikish tolerantligiga

mo'ljallangan bo'lib, davriy ravishda kichik paketlarni yuboradigan uzoqdagi quyosh fermasi datchiklari uchun mukammaldir. Shuningdek, ma'lumotlarni internetga asoslangan boshqaruv panellari yoki ma'lumotlar bazalariga deyarli real vaqt rejimida surish uchun samaralidir.

Masalan, ESP32 yozib oluvchi har daqiqada o'lchovlarning JSON yuklamasi bilan mavzuni (solarFarm1/sectionA/panel10) e'lon qilishi mumkin. Bulutli broker (AWS IoT yoki ThingsBoard Cloud va boshqalar) uni qabul qiladi.

Bulut tomonida ilovalar ma'lumotlarni qayta ishlash yoki saqlash uchun o'sha mavzuga obuna bo'lishi mumkin. AWS IoT xavfsiz TLS shifrlash bilan MQTT (v3.1.1 va v5.0) dan foydalanadi va har bir qurilmadan autentifikatsiyani (ko'pincha sertifikatlar bilan) talab qiladi. Bu dala datchiklaridan olingan ma'lumotlarning bulutga xavfsiz uzatilishini ta'minlaydi. MQTT ning yengil tabiati mikrokontrollerlarga yaxshi mos keladi (masalan, Arduino/ESP MQTT kutubxonalari mavjud) va uning ajratilgan pub/sub (nashr/obuna) modeli SCADA dan doimiy so'rovga muhtoj emassiz, ma'lumotlar tayyor bo'lganda yuborilishini anglatadi.



Rasm 52: MQTT loglash namunasi

Bulutli ro'yxatga olish arxitekturası: Keng tarqalgan arxitektura quyidagicha:

- Dala qurilmasi (datchik + MCU) → MQTT orqali e'lon qiladi → Shlyuz yoki bevosita internet → Bulutli MQTT brokeri.

- Bulutda ThingsBoard, AWS IoT, Azure IoT Hub, Google Cloud IoT va boshqalar kabi platforma MQTT xabarlarini qabul qiladi. Bu platformalar ko'pincha ma'lumotlarni ma'lumotlar bazalariga (vaqt seriyali ma'lumotlar bazalari, ma'lumotlar ko'llari) uzatadi va vizualizatsiya boshqaruv panellari yoki tahlillarni taqdim etadi.
- Bulutli platforma shuningdek qurilmaga MQTT orqali (masalan, biror narsani o'chirish kabi) buyruq mavzusiga obuna bo'lish orqali buyruqlarni qaytarib yuborishi mumkin, bu masofadan boshqarish uchun foydalidir, garchi muhim boshqaruv uchun joyidagi SCADA odatda birlamchi hisoblanadi.

Chetki va SCADA integratsiyasi

Ko'pgina sanoat obyektlari gibrid yondashuvni amalga oshiradi. Muhim bo'lgan real vaqtdagi boshqaruv uchun joyidagi SCADA/PLC hamma narsani boshqaradi (kerak bo'lsa millisoniyali javob bilan). Shu bilan birga, ma'lumotlar nazorat tahlili, mashinali o'qitish yoki uzoq muddatli saqlash uchun bulutga ham uzatiladi. Ularni operatsiyalarni buzmasdan ulash uchun chetki (edge) shlyuz SCADA ma'lumotlariga yoki PLC teglariga obuna bo'lishi va ularni MQTT yoki HTTP orqali bulutga qayta e'lon qilishi mumkin. Buning uchun OPC UA agregatorlari yoki MQTT shlyuzlari kabi vositalar qo'llaniladi. Masalan, quyosh stansiyasidagi OPC UA serveri barcha telemetriyani ochib berishi mumkin; bulutli ulagich obuna bo'ladi va uni AWS IoT ga yuboradi. Aksincha, zamonaviy SCADA dasturlari ba'zan ma'lumotlarni bulutli integratsiya uchun MQTT yoki REST APIlariga e'lon qiladigan modullarni bevosita o'z ichiga oladi.

Xavfsizlik va protokollar

Sanoat integratsiyasi turli protokollar bilan xavfsiz ishlashni talab qiladi. Modbus xavfsizlik bilan yaratilmagan (u oddiy va ishonchli tarmoqni nazarda tutadi). TLS orqali MQTT shifrlash va autentifikatsiyani ta'minlaydi, biroq uni resurslari cheklangan qurilmalarga qo'shish sertifikatlar va kalitlarni ehtiyotkorlik bilan boshqarishni anglatadi. Ko'pgina IoT platformalari har qanday ulanish uchun qurilma hisob ma'lumotlarini talab qiladi, masalan, AWS IoT uchun qurilmalar MQTT brokeriga ulanish maqsadida tegishli sertifikatlarga ega TLS dan foydalanishi kerak. Muhandislar buni rejalashtirishlari, har bir mikrokontroller qurilmasining noyob hisob ma'lumotlariga ega ekanligiga va bir nechta qurilmalar uchun tarjima qiladigan har qanday shlyuz ham xavfsizlikni saqlashiga ishonch hosil qilishlari kerak.

Misol - Quyosh fermasi integratsiyasi

Katta quyosh fermasini tasavvur qiling: Har bir inverter o'sha inverter uchun ma'lumotlarni (kuchlanish, tok kuchi, quvvat, ichki harorat) yig'uvchi kontrollerga ega. Bu kontrollerlar optik tola yoki Ethernet orqali Modbus/TCP yordamida obyektning SCADA si bilan aloqa qiladi. Bir vaqtning o'zida obyektga o'rnatilgan IoT shlyuzi barcha shu ma'lumotlarga obuna bo'ladi (ehtimol SCADA tizimidagi OPC UA serveri orqali) va kompaniyaning markazlashtirilgan monitoring markazi uchun bulutli boshqaruv paneliga xulosa ko'rsatkichlarni e'lon qiladi. Bulutga ma'lumotlarni yuborish chastotasi o'tkazish qobiliyatini tejash uchun har 5 daqiqada bo'lishi mumkin, holbuki SCADA mahalliy boshqaruv uchun har soniyada ma'lumot oladi. Bundan tashqari, obyektida joylashgan mustaqil ob-havo stansiyalari va atrof-muhit datchiklari (ehtimol LoRa yoki ZigBee WSN yordamida) mahalliy shlyuzga ma'lumotlarni jo'natadi, u esa ularni ham SCADA ga (mahalliy kontrollerlar masalan, kuzatuvchilarni himoya qilish uchun shamol tezligidan foydalanishi uchun), ham tahlil qilish uchun bulutga uzatadi. Bulutli platforma (ThingsBoard kabi) ushbu oqimlarni birlashtira oladi va hatto bashoratli texnik xizmat ko'rsatish tahlili kabi yuqori darajadagi funksiyalarni bajarishi mumkin (masalan, bo'limlarning ishlashini solishtirish, g'ayritabiiy og'ishlarni aniqlash). Haqiqatan ham, ThingsBoard hujjatlarida ko'rsatilganidek, u Modbus kabi protokollarni qabul qilib va bulutli ilovalarga chiqarish orqali an'anaviy SCADA qurilmalari va bulut o'rtasida ko'prik bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, integratsiya dala darajasidagi protokollarni (Modbus, OPC UA, mulkiy) bulut/IoT protokollari (MQTT, HTTPS) bilan bog'lashni talab qiladi. Tegishli shlyuzlar va platforma yordamida raqamli asbobsozlik ma'lumotlari paneldagi kichik datchikdan tortib, boshqa shahardagi muhandis uni ko'rib chiqishi mumkin bo'lgan bulutli ma'lumotlar bazasigacha oqishi mumkin. Ushbu ulanish quyosh va sanoat obyektlari bo'ylab ilg'or nazorat boshqaruvi, masofaviy diagnostika va hatto avtomatlashtirilgan optimallashtirish imkonini beradi.

11.3 Ma'lumotlarni saqlash strategiyalari

Raqamli asbobsozlikdan olingan ma'lumotlar turli darajalarda, ya'ni qurilmaning o'zida mahalliy ravishda, chetki nuqtada (edge) (shlyuz yoki mahalliy serverda) yoxud bulutda saqlanishi mumkin, ularning har biri o'zining afzalliklariga ega. Saqlash strategiyasini tanlashda ishonchlilik, kechikish, foydalanish imkoniyati va ma'lumotlar hajmini hisobga olish kerak.

Mahalliy saqlash

Ma'lumotlarni mahalliy saqlash ularni yig'ish nuqtasida qoldirishni anglatadi. Mikrokontrollerli ro'yxatga oluvchilar uchun bu SD karta yoki qurilmadagi ichki flesh xotira bo'lishi mumkin. Masalan, ob-havoni qayd qiluvchi qurilma har daqiqada ma'lumotlarni SD kartadagi CSV fayliga saqlashi mumkin. Buning afzalligi shundaki, hatto aloqa uzilib qolsa ham ma'lumotlar yozib olinadi; qurilma mustaqildir. U shuningdek juda tez (tarmoqda kechikish yo'q) va ma'lumotlarga joyning o'zida darhol kirish mumkin. Biroq, mahalliy saqlash sig'im va xavfsizlik borasida cheklovlarga ega, SD karta to'lishi yoki eskirishi mumkin, va agar qurilma shikastlansa yoki yo'qolsa (yoki karta buzilsa), muntazam ravishda ko'chirib olinmasa ma'lumotlar yo'qolishi mumkin. Quyosh stansiyalarida mahalliy ma'lumotlarni ro'yxatga olish ko'pincha zaxira vazifasini o'taydi; masalan, har bir invertorning kontrolleri oxirgi X kungi ma'lumotlarning aylanma buferini saqlashi mumkin, shunday qilib SCADA yoki tarmoq ishlamay qolsa, hech qanday ma'lumot yo'qolmaydi va ularni keyinroq olish mumkin bo'ladi.

Chetki (Edge) saqlash

"Chetki" deganda alohida datchiklarga qaraganda kuchliroq bo'lgan, lekin jarayonga nisbatan mahalliy hisoblangan joydagi hisoblash qurilmasi tushuniladi (masalan, sanoat kompyuteri yoki boshqaruv xonasidagi shlyuz). Chetki saqlash ko'plab mahalliy qurilmalardan olingan ma'lumotlarni yig'uvchi mahalliy server yoki ma'lumotlar bazasini o'z ichiga olishi mumkin. Masalan, quyosh stansiyasidagi tarix serveri (OSIsoft PI yoki oddiy SQL ma'lumotlar bazasi kabi) ushbu obyektidan kelgan barcha telemetriyani saqlashi mumkin. Bu yakka qurilmalarga qaraganda kattaroq sig'imni taklif etadi va mahalliy foydalanuvchilarga tezkor xizmat ko'rsata oladi (past kechikishli ulanish). Shuningdek, u rezervlashni (masalan, RAID drayverlari, mahalliy zaxira nusxalari) amalga oshirish uchun yagona nuqtani ta'minlaydi, shu sababli ma'lumotlar xavfsizroq bo'ladi. Chetki saqlash joyida zudlik bilan tahlil qilish yoki bulutga qaram bo'lmagan holda boshqarish maqsadida qayta aloqa kerak bo'lganda foydalidir. Shuningdek, u bulut uchun ma'lumotlarni buferlashi mumkin: masalan, chetki shlyuz barcha ma'lumotlarni saqlaydi va ularni ommaviy ravishda bulutga uzatadi, agar internet ulanishi uzilib qolsa, ulanish tiklanguncha saqlashda davom etadi (ma'lumotlar yo'qolishining oldini oladi). Ushbu usul IoT Shlyuzining tarmoqdagi uzilishlar paytida mahalliy buferlashni ta'minlovchi xususiyati sifatida aytib o'tilgan. Aslini olganda, chetki qurilma mahalliy kesh va zaxira vazifasini bajarishi mumkin. Ko'pgina zamonaviy tizimlar bularning kombinatsiyasidan foydalanadi: ma'lumotlarni yuqori ajrata olish qobiliyatida mahalliy ravishda ro'yxatga oladi, o'tkazish qobiliyatini tejash uchun ularning bir qismini yoki qisqacha xulosasini bulutga yuboradi.

Bulutli saqlash

Bulutga asoslangan saqlash ma'lumotlarni masofaviy serverlarga/ma'lumotlar markazlariga (AWS, Azure, Google yoki shaxsiy bulutlar kabi provayderlar tomonidan boshqariladigan) yuborishni o'z ichiga oladi. Bulut deyarli cheksiz saqlash sig'imini, yuqori chidamlilikni (ma'lumotlar markazlari bo'ylab bir nechta nusxalar) va istalgan joydan oson masofaviy kirishni taklif qilishi mumkin. Bu bir nechta obyektlardan ma'lumotlarni yig'ish uchun ideal, masalan, 50 ta quyosh fermasiga ega kompaniya solishtirish va katta ma'lumotlarni (big data) tahlil qilish uchun barcha ma'lumotlarni bitta markaziy bulutli ma'lumotlar bazasida saqlashi mumkin. Bulutli saqlash turli shakllarda bo'lishi mumkin: oddiy fayllar, vaqt seriyali ma'lumotlar bazasi, relyatsion ma'lumotlar bazasi yoki ixtisoslashtirilgan IoT ma'lumotlar omborlari. Unda ko'pincha Amazon S3 (obyektlarni saqlash) yoki DynamoDB/InfluxDB (NoSQL vaqt seriyali) kabi texnologiyalardan foydalaniladi. Xavfsizlik eng muhim masala bo'lib, ma'lumotlar xavfsiz tarzda uzatilishi (tranzitda shifrlangan) va xavfsiz saqlanishi kerak (ko'pincha harakatsiz holatda shifrlangan va autentifikatsiya ortida himoyalangan). Bulutli saqlashda internetga ulanishni va yuzaga kelishi mumkin bo'lgan kechikishni rejalashtirish kerak. Agar real vaqt rejimida boshqaruv qarorlari kerak bo'lsa, kechikish va ulanishga bog'liqlik tufayli faqatgina bulutli saqlash mos kelmaydi (shu sababli boshqaruv halqalari uchun ba'zan chetki hisoblash (edge computing) afzal ko'riladi). Biroq, monitoring va tahlillar uchun bulut ajoyib tanlovdir.

Amaliyotda tizimlar ushbu strategiyalarni birlashtiradi:

- Mahalliy: Ma'lumotlarni zudlik bilan ushlash uchun tez va chidamli (masalan, ob-havo stansiyasidagi mahalliy yozib oluvchi).
- Chetki (Edge): O'rtacha muddatli saqlash qobiliyatiga ega ishonchli oraliq bo'g'in (masalan, stansiya SCADA tarixi 1 yillik ma'lumotlarni saqlaydi).
- Bulut: Uzoq muddatli, korporativ darajadagi ma'lumotlar ko'li (masalan, tendensiyalarni tahlil qilish uchun barcha stansiyalarning ishlash muddati davomidagi ma'lumotlari).

Umumiy tavsiya shuki, zaxira uchun ma'lumotlarni mahalliy yoki chetki nuqtada yozib oling va markaziy tahlil hamda obyekt tashqarisidagi zaxiralash (ma'lumotlar yaxlitligiga kamar-va-tasmalar - belt-and-suspenders yondashuvi) uchun bulutdan foydalaning.

Ma'lumotlar qaysi formatda saqlanishi moslik va samaradorlik uchun muhim ahamiyatga ega:

- CSV (Vergul bilan ajratilgan qiymatlar): Har bir qator yozuv bo'lgan, maydonlar vergul bilan ajratilgan oddiy matn formati. CSV ni insonlar o'qishi mumkin va uni elektron jadvallar yoki ma'lumotlar bazalariga kiritish oson. U vaqt seriyali datchik ma'lumotlarini jadval ko'rinishida yozib olish uchun juda mos (vaqt belgisi, datchik1, datchik2, ...). Masalan, ma'lumotlarni qayd qiluvchi qurilma "2025-06-24 13:00:00, 45.2, 100.5" qatorini qo'shishi mumkin, bu o'sha vaqtda 45.2°C va 100.5 kPa degani. CSV ning afzalliklari soddaligi va kam yuksiz ishlashidir. Biroq, u ma'lumotlar turlarini yoki iyerarxiyalarni qo'llab-quvvatlamaydi va katta hajmli bo'lib ketishi mumkin (matnni takrorlash orqali). U ma'lumotlar haqiqatan ham jadval ko'rinishida bo'lsa va vaqti-vaqti bilan insonlar tomonidan olinadigan yoki o'qiladigan bo'lsa idealdir. Ko'pgina quyosh stansiyasi kontrollerlari har kuni CSV hisobotlarini eksport qiladi.
- JSON (JavaScript Object Notation): Ma'lumotlarni ichma-ich joylashgan kalit-qiymat juftliklari sifatida kodlaydigan matn formati (tuzilmali daraxt kabi). JSON IoT uchun juda mashhur, chunki u tuzilmali ma'lumotlarni (masalan, metama'lumotlar bilan datchik ko'rsatkichi) osongina ifodalay oladi. Masalan:

```
{ "timestamp": "2025-06-24T13:00:00Z", "sensor": "Panel10_Temp", "value": 45.2 }
```

JSON o'zini o'zi tavsiflaydi (kalitlar ma'lumotlarni yorliqlaydi) va veb-ilovalar hamda tillar tomonidan osongina tahlil qilinadi (parse). U MQTT xabarlarida va RESTful API-larda qo'llaniladi. Saqlash uchun JSON jurnal fayllarida yoki NoSQL ma'lumotlar bazalarida ishlatilishi mumkin. U CSV ga qaraganda moslashuvchanroq (sxemani buzmasdan maydonlarni qo'shishingiz mumkin), lekin odatda biroz kattaroq (kalitlar takrorlanadi). JSON iyerarxik ma'lumotlar uchun juda mos keladi, masalan, bitta yozuvda bir nechta datchiklarni ro'yxatga olish:

```
{ "time": "...", "temperatures": [45.2, 44.8, 46.1], "unit": "C" }
```

Mikrokontrollerlarda tahlil qilish (parsing) narxini (bu boshqarish mumkin bo'lgan, ammo CSV ga qaraganda og'irroq) hisobga olish kerak.
- SQL ma'lumotlar bazalari: Bu ma'lumotlarni relyatsion ma'lumotlar bazasida (masalan, SQLite, MySQL, PostgreSQL) saqlashni anglatadi. Ma'lumotlar ustunlar va qatorlarga ega jadvallarga tuzilgan. Vaqt seriyali datchik ma'lumotlari uchun Measurements (vaqt_belgisi, datchik_id, qiymat) kabi jadval bo'lishi mumkin. SQL dan foydalanishning afzalligi kuchli so'rovlar (o'rtacha qiymatlar, birlashmalar, shartlar va hokazolarni so'rashingiz mumkin) va ma'lumotlar yaxlitligini ta'minlashda (turlar va cheklovlar). Ko'pgina sanoat tizimlari ma'lumotlarni to'plash uchun chetki (edge)

nuqtalarda yoki bulutda SQL ma'lumotlar bazalaridan foydalanadi. Masalan, chetki (edge) kompyuter barcha o'qishlarni mahalliy darajada saqlash uchun yengil SQLite ma'lumotlar bazasini ishga tushirishi mumkin; yoki bulut katta SQL ma'lumotlar omboridan foydalanishi mumkin. Kichik qurilmalar uchun salbiy tomoni shundaki, SQL dvigatelini ishga tushirish og'ir bo'lishi mumkin va fleshga murakkab naqshlarda yozish oddiy ro'yxatga olishdan ko'ra uni tezroq eskitishi mumkin. Ammo Raspberry Pi yoki sanoat kompyuterida SQL juda qulay va darhol tahlil qilish imkoniyatini beradi (masalan, "Kecha 12-13 oralig'ida o'rtacha nurlanish qanday bo'lgan?"). Zamonaviy vaqt seriyali ma'lumotlar bazalari (InfluxDB, TimescaleDB kabi) vaqt belgilari bilan indekslangan katta hajmdagi ma'lumotlarni samarali boshqarish uchun SQL yoki shunga o'xshash interfeyslarni kengaytiradi.

Siqish

Ma'lumotlar to'planib borgach (ayniqsa, yuqori ajrata olish qobiliyatiga ega yozib olishda), joy va o'tkazish qobiliyatini tejash uchun siqish muhim bo'lib qoladi. Oddiy usullar matn o'rniga ikkilik ma'lumotlarni saqlashdan foydalanishni o'z ichiga oladi (masalan, faylga xom ikkilik suzuvchi nuqtali (float) sonlarni yozish, garchi bunda inson o'qishi mumkinligini yo'qotib, ixchamlikka erishsangiz ham). CSV/JSON ni sezilarli darajada kichraytira oladigan siqish algoritmlari (zip, gzip) ham mavjud (ko'pincha 5-10 baravar kichikroq), chunki datchik ma'lumotlari takrorlanuvchan bo'ladi. Xotirasi cheklangan chetki (edge) qurilmalarda har soat yoki kunda siqiladigan va arxivlanadigan aylanma jurnal faylini amalga oshirish mumkin. Agar ma'lumotlar tarmoq orqali yuborilsa, yuklamalarni siqish (yoki Protocol Buffers yoki CBOR, siqilgan ikkilik JSON kabi samarali kodlashdan foydalanish) o'tkazish qobiliyatini kamaytirishi mumkin. Masalan, matn ko'rinishidagi bir kunlik 1 daqiqalik ma'lumotlar bir necha megabaytni tashkil qilishi mumkin, lekin siqilganda, ehtimol, bir necha yuz kilobayt bo'lishi mumkin. Buning evaziga siqish/ochish uchun qo'shimcha ishlov beriladi.

Xavfsizlik

Ma'lumotlar mahalliy yoki bulutli bo'lishidan qat'i nazar himoyalangan bo'lishi kerak. Mahalliy darajada ruxsatsiz jismoniy kirishning oldini olish (ro'yxatga oluvchi qutilariga qulflar) va ayniqsa qurilmalar o'g'irlanishi mumkin bo'lsa, nozik ma'lumotlarni shifrlashni ko'rib chiqish kerak (olislardagi quyosh fermasining aralashuv bo'lishi mumkin bo'lgan ob-havoni qayd qiluvchi qurilmasini tasavvur qiling, odatda ma'lumotlar o'ta nozik bo'lmaydi, ammo agar u energiya unumdorligi

ma'lumotlari bo'lsa, kompaniya unga tijorat siri sifatida qarashi mumkin). Tarmoqda xavfsizlik juda muhim: AWS IoT MQTT kabi protokollar talab qilganidek, bulutga tranzitdagi ma'lumotlar uchun shifrlashdan (TLS/SSL) foydalaning. Bulutda faqat ruxsat etilgan foydalanuvchilar/tizimlar ma'lumotlarga kirishi uchun tegishli autentifikatsiyadan foydalaning va bulut API kalitlari yoki sertifikatlarini xavfsiz saqlang (ehtimol qurilmalarning xavfsiz elementida saqlanadi). Bundan tashqari, rollarga asoslangan kirishni boshqarish kimlar ma'lumotlarni o'zgartirishi yoki o'chirishi mumkinligini cheklashi mumkin. Yana bir jihat - ma'lumotlar fayllari buzilgan yoki o'zgartirilganligini aniqlash uchun tekshirish summalari (checksum) yoki heshlardan foydalangan holda ma'lumotlar yaxlitligini ta'minlash.

Zaxira va Rezervlash (Redundancy)

Ma'lumotlarda rezervlash ma'lumotlar yo'qolishining oldini olish uchun bir nechta nusxalar yoki yo'llarga ega bo'lishni anglatadi. Chetki (edge) va bulutli strategiyalar ko'pincha rezervlash avtomatik ravishda amalga oshiradi (bulut provayderlari ma'lumotlarni serverlar bo'ylab nusxalaydi). Obyektda bir-birini takrorlovchi (mirrored) yozib olish qurilmalari yoki serverda RAID saqlash xotirasi bo'lishi mumkin. Eng yaxshi amaliyotlardan biri mahalliy ma'lumotlarni vaqti-vaqti bilan boshqa joyga zaxiralashdir (masalan, aloqa mavjud bo'lganda kunlik CSV jurnalini SD-karta ro'yxatga oluvchisidan markaziy serverga yuborish). Taqsimlangan energiya tizimlarida siz har bir stansiya ma'lumotlarni bir hafta davomida mahalliy ravishda saqlashini va shuningdek bulutga uzatishini sozlashingiz mumkin; agar bulut aloqa muammolari tufayli ba'zi ma'lumotlarni o'tkazib yuborsa, u stansiyadan qayta yuborishni so'rashi mumkin (yoki oxirgi chora sifatida muhandis SD kartani qo'lda olishi mumkin). Rezervlashni rejalashtirish bitta komponent ishlamay qolsa ham ma'lumotlar butunlay yo'qolmasligini ta'minlaydi. Masalan, IoT shlyuzi oxirgi N kunlik ma'lumotlarning nusxasini saqlaydigan o'rnatilgan fleshga ega bo'lishi mumkin; garchi u hamma narsani bulutga uzatsa-da, kerak bo'lganda har qanday bo'shliqlarni to'ldirishi mumkin.

Ma'lumotlar yashash sikli va hajmi

Yana bir e'tibor qaratiladigan jihat ma'lumotlarni turli bosqichlarda qancha vaqt saqlashdir. Dastlabki yuqori chastotali ma'lumotlar mahalliy darajada qisqa vaqt saqlanishi mumkin (aytaylik, bir haftalik xom 1 soniyalik ma'lumotlar), lekin uzoqroq muddat uchun birlashtirilgan yoki pasaytirilgan diskretlash chastotasida (downsampled) olinishi mumkin. Agar batafsil tahlil qilish kerak bo'lmasa, hajmni kamaytirish uchun bulut faqat 15 daqiqalik o'rtacha qiymatlarni saqlashi mumkin.

Qaysi ma'lumotlarni arxivlash, qaysilarini siqish va nimalarni o'chirish (agar bo'lsa) to'g'risida qaror qabul qilish saqlash strategiyasining bir qismidir. Quyosh energiyasi ilovalarida ma'lumotlar ko'pincha ishlashni tahlil qilish, kafolat da'volari, tadqiqotlar va boshqalar uchun qadrlidir, shuning uchun odatda kompaniyalar iloji boricha ko'proq, hech bo'lmaganda xulosa ko'rinishida saqlashga harakat qilishadi.

Aslini olganda, ishonchli ma'lumotlarni yozib olish tizimi ko'pincha ko'p bosqichli saqlashni qo'llaydi: ishonchlilik va tezkor qayta aloqa uchun darhol mahalliy/chetki (edge) yozib olish, hamda to'plash, uzoq muddat saqlash va masofadan kirish uchun bulutli saqlash. Tegishli fayl formatlaridan, siqishdan va xavfsiz uzatishdan foydalanish bu jarayonning samarali va xavfsiz amalga oshirishini ta'minlaydi. Masalan, quyosh energiyasi monitoring tizimi obyektidagi operatsion xodimlar uchun ma'lumotlarni CSV formatida mahalliy ravishda qayd etishi, shu bilan birga muhandislar barcha obyektlar bo'ylab tahlillarni amalga oshirishlari mumkin bo'lgan bulutli ma'lumotlar bazasiga JSON ma'lumotlarini yuborishi mumkin. Strategiyalar bir-birini to'ldiradi va operatsion ehtiyojlarni korporativ darajadagi ma'lumotlardan foydalanish bilan bog'lashga yordam beradi.

Savol Javoblar - Ma'lumotlarni yozib olish va saqlash:

- *1-savol: Datchik ma'lumotlarini SD kartada mahalliy ravishda saqlash bilan uni darhol bulutli ma'lumotlar bazasiga yuborish o'rtasidagi murosali (trade-off) jihatlar nimadan iborat? Ma'lumotlar mavjudligi, xavfsizlik va ishonchlilik kabi omillarni hisobga oling.*
- *2-savol: Nima uchun sanoat IoT tizimi ma'lumotlarni buferlash uchun chetki (edge) shlyuzdan foydalanishi mumkin? Tarmoqda uzilish vaqtida shlyuz ma'lumotlarni buferlamasa, nima uchrashi mumkinligini va bu ma'lumotlar yaxlitligiga qanday ta'sir qilishini tasvirlab bering.*

12. Simsiz va masofaviy o'lchov tizimlari

12.1 Simsiz datchiklar tarmoqlari (WSN)

Simsiz datchiklar tarmog'i (WSN) fizik yoki atrof-muhit sharoitlarini kuzatish uchun simsiz aloqa qiluvchi taqsimlangan datchik tugunlari yig'indisidir. WSN dagi har bir tugun odatda bir yoki bir nechta datchiklar, kam quvvatli mikrokontroller, radio transiver va quvvat manbai (ko'pincha batareya bilan ishlaydigan, ba'zan quyosh elementlari kabi energiyani yig'uvchi tizim bilan) o'z ichiga oladi. Tugunlar markaziy yig'uvchiga (baza stansiyasi yoki shlyuz) yetib borish uchun tarmoq orqali ma'lumotlarni uzatish (relaying) orqali hamkorlik qiladi.

Arxitektura va tugunlar turlari

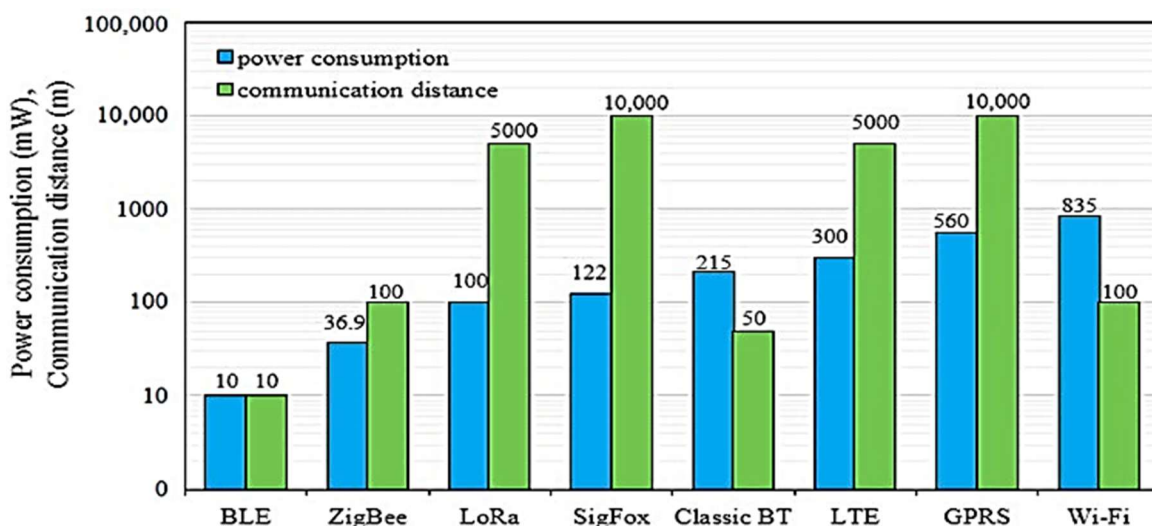
WSN tugunlari tayinlangan rollarga ega bo'lishi mumkin. Keng tarqalgan arxitektura yulduz topologiyasi (star topology) bo'lib, unda bir nechta datchik tugunlari (oxirgi qurilmalar) bevosita markaziy koordinator tuguniga (shlyuz) ulanadi. Bunday holda, oxirgi tugunlar asosan faqat o'z ma'lumotlarini shlyuzga yuboradi (va quvvatni tejash uchun uzatmayotganda uyqu rejimiga o'tadi). Shlyuz ko'pincha tarmoqdan quvvat oladi yoki yuqori sig'imga ega bo'ladi va ma'lumotlarni server yoki SCADA tizimiga uzatishi mumkin. Boshqa tomondan, to'r (mesh) topologiyasida tugunlar nafaqat o'z ma'lumotlarini jo'natadi, balki boshqa tugunlar uchun marshrutizator (router) vazifasini ham bajaradi va ma'lumotlar shlyuzga yetguniga qadar xabarlarini bir necha marta sakrab o'tish (hop) orqali o'tkazadi. Bu uzoqroq masofani qamrab oladi va ortiqchalikni qo'shadi (agar bitta tugun ishlamay qolsa, ma'lumotlar boshqa yo'l orqali marshrutlanishi mumkin), buning evaziga ko'proq murakkablik va har bir marshrutizator tuguni tez-tez faol bo'lishi (ko'proq quvvat sarflab) kerak.

Zigbee (IEEE 802.15.4 ga asoslangan) kabi standartlashtirilgan WSN protokollarida tugun turlari Koordinator (tarmoq uchun bitta, asosiy shlyuz), Marshrutizator (xabarlarni uzatuvchi va datchiklarga ega bo'lishi mumkin bo'lgan oraliq tugunlar) va Oxirgi qurilma (faqat ota tugun bilan aloqa qiladigan va tez-tez uxlashi mumkin bo'lgan barg tuguni) sifatida belgilanadi. Masalan, issiqxonani monitoring qilish uchun Zigbee yulduz tarmog'ida uchta datchik tuguni Zigbee oxirgi qurilmalari (dala tugunlari) sifatida va bittasi ma'lumotlarni yig'uvchi Zigbee koordinatori sifatida o'rnatilgan edi. Koordinator barcha datchik ko'rsatkichlarini yig'di va aktuatorlar (masalan, sug'orish klapanlari) va ehtimol bulutga tashqi ulanish bilan bog'landi. Ba'zi tarmoqlar klaster-boshlig'i (cluster-head) tashkilotiga

ruxsat beradi: klaster-boshlig'i o'z klasteridagi tugunlardan ma'lumotlarni to'playdi va keyin tayanch stansiyasiga yuboradi, bu energiyani tejash uchun kattaroq WSN larda keng tarqalgan strategiyadir.

Quvvatni boshqarish

WSN lar odatda quvvat yoki ma'lumotlar uchun sim yotqizish noqulay yoki imkonsiz bo'lgan stsenariylarda (masalan, keng tarqalgan quyosh fermalari, masofaviy atrof-muhit monitoringi, aylanuvchi mexanizmlar ichida) qo'llaniladi. Shuning uchun quvvatni boshqarish juda muhimdir. Tugunlar ko'pincha batareyalar (ba'zan yillar davomida ishlashi kutiladi) yoki energiya yig'uvchi tizimlar (kichik quyosh panellari, tebranish energiyasi va h.k.) yordamida ishlaydi. Ishlash muddatini uzaytirish uchun tugunlar kam quvvatli elektronikadan va keskin ish siklidan (duty cycling) foydalanadi, ya'ni ular vaqtining ko'p qismini uyqu rejimida o'tkazadilar va faqat o'lchov olish hamda uni uzatish uchun qisqa vaqtga uyg'onadilar. Masalan, harorat datchigi tuguni har 5 daqiqada uyg'onishi, datchigi va radiosini yoqishi, ko'rsatkichni yuborishi, keyin yana hamma narsani o'chirishi mumkin. Radio protokollari buni uxlayotgan tugunlar uyg'onguncha marshrutizatorlar yoki koordinatorlarga xabarlarini buferlash imkonini berish orqali qo'llab-quvvatlaydi (pastga yo'naltirilgan - downlink aloqasi uchun).



Rasm 53: Turli xil WSN turlarining masofaga nisbatan quvvat sarfi

Another power tactic is **adaptive sampling and reporting**: if values aren't changing, nodes may report less frequently or at lower radio power. Additionally, as indicated in many WSN research efforts, duty cycle control is key: scheduling nodes' active periods to minimize overlap and idle listening reduces power consumption

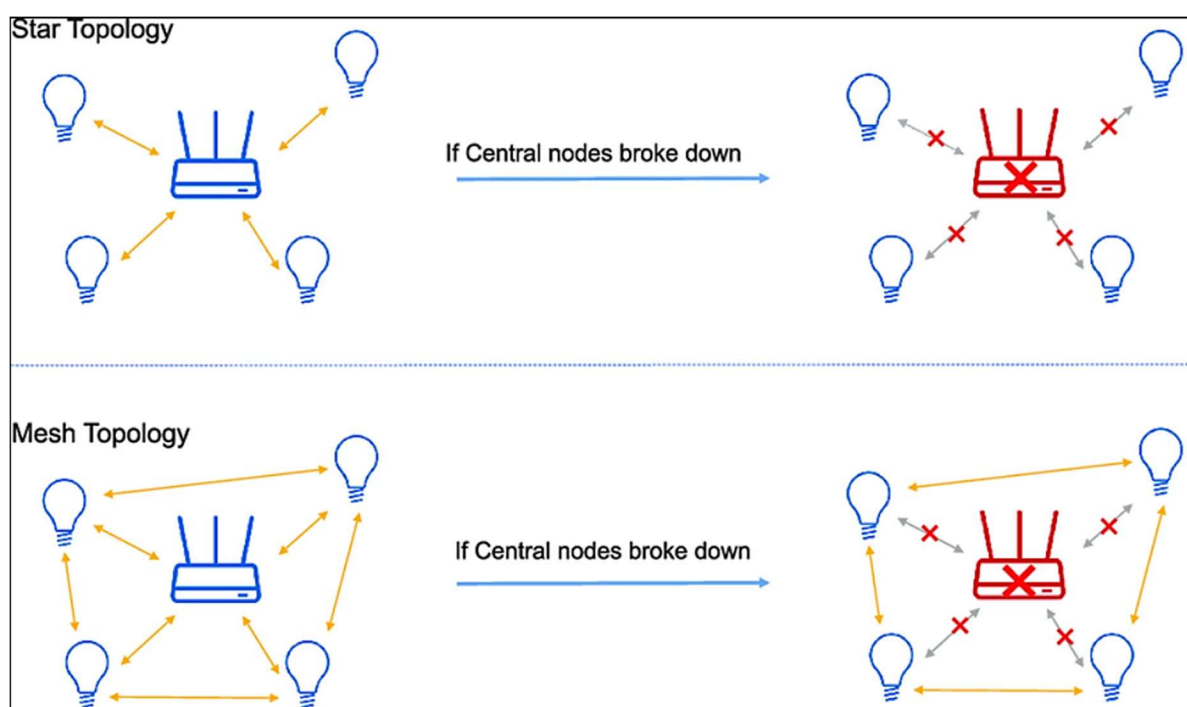
dramatically. In some studies, solar energy harvesters are attached to nodes to recharge their batteries, especially in applications like agricultural or solar farm monitoring where sunlight is available. In one example, a WSN in a field had nodes with small solar panels so that even with frequent sensing, the network could sustain itself indefinitely (harvesting a few mW).

To'r (Mesh) va Yulduz topologiyalari

- Yulduz topologiyasi: Barcha datchik tugunlari to'g'ridan-to'g'ri shlyuz bilan aloqa qiladi (bitta sakrash - hop doirasida). Bu oddiy va ko'pincha pastroq kechikish hamda kamroq marshrutlash xarajatlarini (overhead) beradi. Shlyuz odatda barcha tugunlarning radio qamrovida bo'lishi kerak. Yulduz topologiyasi hudud unchalik katta bo'lmaganda yoki uzoq masofaga ega kuchli markaziy tugunni (masalan, yuqori daromadli - high-gain antennadan foydalangan holda) ta'minlay olganingizda idealdir. Yulduz tarmoqlarini boshqarish osonroq (ko'p marta sakrab o'tuvchi - multi-hop marshrutlash muammolari yo'q) va tugunlarda ko'pincha kamroq quvvat sarflanadi (har bir tugun boshqalarning xabarlarini takrorlamasdan, faqat bazaga o'z uzatishini quvvatlaydi). Biroq, agar tugun juda uzoqda bo'lsa yoki to'siq uni to'sib qo'ysa, yulduz topologiyasida muqobil yo'l yo'q. Shuningdek, shlyuz ishlamay qolsa, butun tarmoq ishlamaydi (yagona xato nuqtasi - single point of failure).
- To'r (ko'p marta sakrab o'tish - multi-hop) topologiyasi: Tugunlar vositachi bo'lib xizmat qilishi mumkin. Bu qamrovni kengaytiradi, shlyuzdan uzoqda bo'lgan tugun yaqinroq tugunlar orqali sakrab o'tishi mumkin. Shuningdek, u ortiqchalikni yaratadi, agar bitta yo'l to'sib qo'yilsa yoki bitta tugun ishlamay qolsa, xabarlar boshqa yo'ldan borishi mumkin. To'r tarmoqlari (Zigbee mesh kabi) katta yoki tartibsiz hududlarni qamrab olishi va xalaqitlarni dinamik ravishda aylanib o'tishi mumkin. Bunga kelishuv - bu marshrutlash protokollaridagi murakkablik va odatda yuqoriroq quvvat sarfi: marshrutizator tugunlari boshqalardan xabarlarini tinglashi va jo'natishi kerak, ya'ni ular barg tugunlari kabi ko'p uxlay olmaydilar. To'r tarmoqlari ham ko'proq kechikishlarga olib kelishi mumkin (ma'lumotlar bir necha marta sakrashi - hop mumkin va har bir sakrash qayta ishlash va navbat vaqtini qo'shadi). Sanoat energetika tizimlarida to'r (mesh) tarmoq, masalan, o'nlab gektar bo'ylab bir marta sakrash doirasi yetib bormasligi mumkin bo'lgan keng quyosh fermasini yoki tasodifiy RF to'silishini yumshatuvchi bir nechta yo'llarga ega bo'lish metall konstruktsiyalari mavjud bo'lgan muhitni monitoring qilish uchun foydalidir. Qishloq xo'jaligidagi WSN tadqiqotlaridan bir eslatma, Zigbee ning qisqa masofasi hududni qoplash uchun marshrutizator tugunlarini o'rnatish orqali

yumshatilishi mumkin, quvvatni past ushlab turgan holda diapazonni kengaytirish uchun samarali to'r (mesh) yaratsa bo'ladi.

Ko'pgina amaliy ilovalar gibril bo'lib qoladi: shlyuzlari (simli yoki simsiz) markaziy uzalga ulanadigan yulduz tarmoqlari klasterlari yoki quvvat sarfini muvozanatlash uchun bir nechta doimo yonib turadigan marshrutizator tugunlari hamda ko'plab uxlayotgan barg tugunlariga ega to'r (mesh) tarmoq. Aniq tanlov kerakli qamrov, relef va energiya mavjudligiga bog'liq.



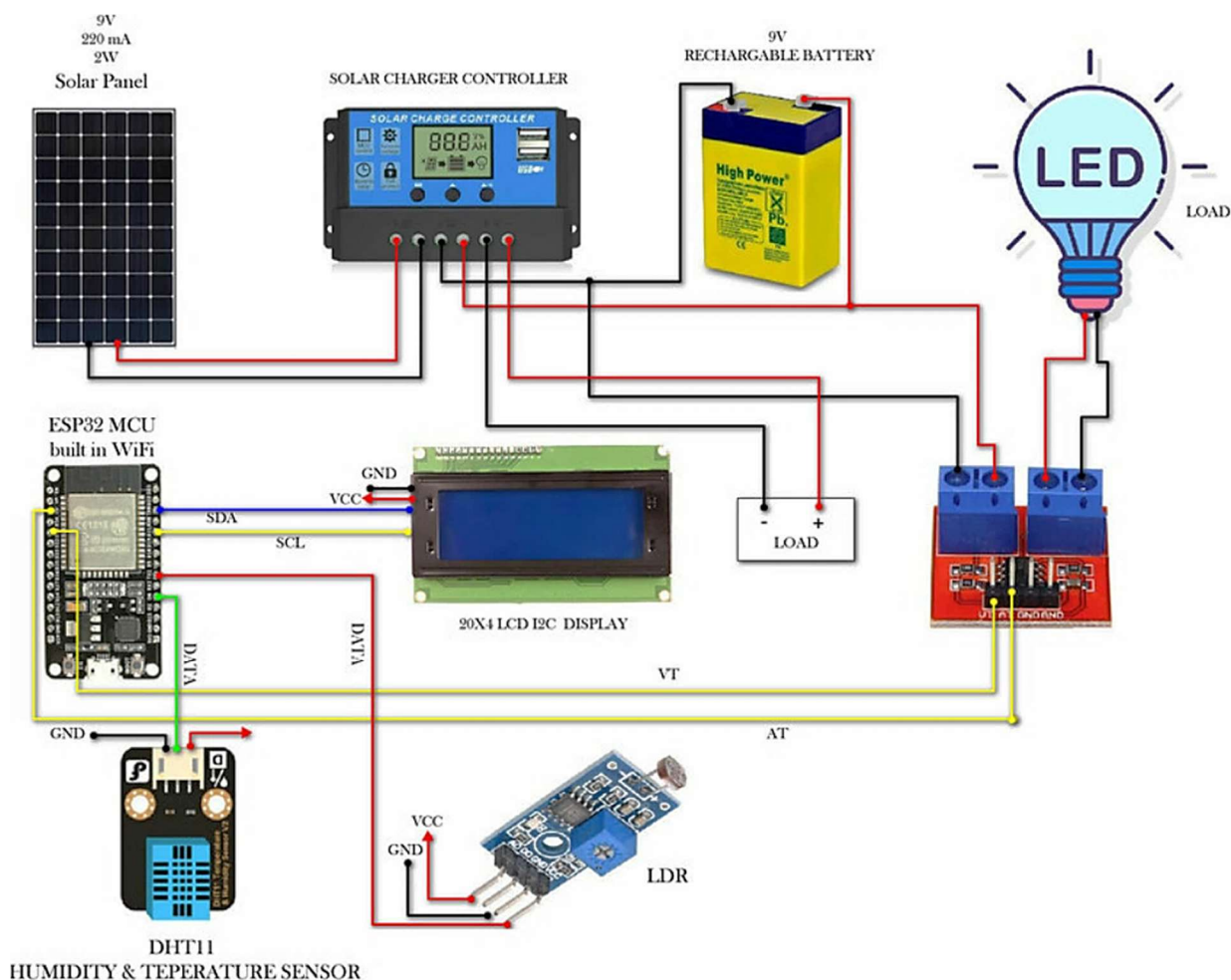
Rasm 54: Star va Mesh topologiyalari

Quyosh fermalarida ahamiyati

Quyosh fotovoltaiik (PV) fermalari va quyosh-issiqlik stansiyalari WSN lardan katta foyda olishi mumkin. Ushbu hududlar ko'pincha katta ochiq joylarni o'z ichiga oladi, har bir datchik uchun (panel haroratlarini, turli nuqtalarda quyosh nurlanishini, panellarni tozalash suvidan foydalanish uchun tuproq namligini va hokazolarni kuzatish uchun) kabellarni o'tkazish qimmatga tushishi va nosozliklarga moyil bo'lishi mumkin. WSN lar datchiklarni panellarda yoki dalada simsiz joylashtirishga imkon beradi. Masalan, vakillik quyosh panellariga biriktirilgan kichik datchik tugunlari panel harorati va nurlanishini o'lchashi va ma'lumotlarni markaziy stansiyaga simsiz yuborishi mumkin. Bu massiv qismlarining ifloslanganligi yoki qizib ketganligini (profilaktik tozalash yoki sovutish uchun) aniqlashga yordam beradi. WSN tugunlari shuningdek, perimetrni (xavfsizlik yoki yovvoyi tabiatning

kirib kelishi) yoki hudud bo'ylab ob-havoni (shamol o'zgarishi mumkinligi sababli bir nechta nuqtalarda shamolni o'lchash) nazorat qilishi mumkin.

Aniq bir misol sifatida ESP32 ga asoslangan simsiz tugunlar quyosh panelining ishlashini monitoring qilish uchun ishlatilgan prototipni keltirish mumkin: har bir tugun panel kuchlanishini, tok kuchini va haroratni o'lchagan, so'ngra ma'lumotlarni markaziy marshrutizatorga (shlyuz) simsiz yuborgan; u yerdan ma'lumotlar internet orqali serverga o'tgan. Tizim har bir panelning chiqishi va holatini real vaqt rejimida, masofadan monitoring qilish imkonini berdi. ESP32 da Wi-Fi mavjud bo'lganligi sababli, bu holda to'g'ridan-to'g'ri Wi-Fi tarmog'idan foydalanilgan bo'lishi mumkin (agar masofa ruxsat bersa). Shu bilan bir qatorda, yulduz topologiyasi bilan Zigbee yoki LoRa ga asoslangan WSN ishlatilishi mumkin, panellardagi tugunlar inverter stansiyasidagi shlyuzga hisobot beradi.



Rasm 55: Fotovoltaik tizimni ESP32 bilan monitoring qilish sxema namunasi

Ushbu tugunlar uchun quvvatni hisobga olish kerak: ko'pincha ular o'zlarining kichik quyosh elementlari va batareyalarini o'z ichiga olishi mumkin (ular quyosh panelida o'tirgani uchun quyosh nuri ko'p). Bu asosan ularni fermaning simsiz spektridan foydalanadigan, lekin simli quvvat manbaiga muhtoj bo'lmagan, o'zini-

o'zi ta'minlaydigan IoT qurilmalariga aylantiradi. Bu ajoyib sinergiya: quyosh fermalari o'zlarining datchiklar tarmog'ini quvvatlantiradi.

Xulosa qilib aytganda, WSN arxitekturasida (to'r (mesh)ga qarshi yulduz, tugun rollari) ilovaning o'lchami va ishonchlilik ehtiyojlariga moslashtirilishi kerak. Ammo quyosh va sanoat sharoitlaridagi afzalliklar orasida datchiklarni moslashuvchan o'rnatish, miqyoslanish qobiliyati (shunchaki uni joylashtirish va tarmoqqa ulanishni sozlash orqali yangi datchik tugunini qo'shish oson) va o'rnatish xarajatlarini kamaytirish ehtimoli kiradi. Qiyinchiliklar ko'pincha ishonchli simsiz qamrovni ta'minlashda (antennalar, RF xalaqitlaridan qochish) va tugunlarga texnik xizmat ko'rsatishda (garchi uzoq xizmat muddati maqsad qilingan bo'lsa-da, agar energiyani yig'uvchi tizim bo'lmasa, batareyani almashtirish) yotadi. Ilg'or WSN protokollari qurilmaning qo'shilishi/xavfsizligini, to'qnashuvlardan qochishni va tarmoq marshrutlarini o'zini-o'zi tiklashni (self-healing) boshqarib, ularni sanoatda foydalanish uchun mustahkam qiladi. Masalan, agar quyosh fermasidagi yuk mashinasi bitta datchikni urib yuborsa, to'r (mesh) tarmog'i uni almashtirguncha aylanib o'tish marshrutini yaratishi mumkin..

12.2 RF, ZigBee va LoRa protokollari

Simsiz datchik tarmoqlari va masofaviy telemetriya turli xil radiochastota (RF) aloqa texnologiyalaridan foydalanadi. Bu yerda biz ZigBee va LoRa kabi bir nechta asosiy texnologiyalarni solishtiramiz va ularning masofa, quvvat sarfi, kechikish va o'tkazish qobiliyati kabi xususiyatlarini, ayniqsa sanoat energetika tizimlari kontekstida muhokama qilamiz. (Biz bu yerda "RF" ni radio aloqalari uchun umumiy atama sifatida ishlatamiz; ZigBee va LoRa maxsus RF protokollari/standartlaridir.)

ZigBee (IEEE 802.15.4 ga asoslangan)

ZigBee ko'pincha to'r (mesh) topologiyasida bo'lgan kam quvvatli, past ma'lumot uzatish tezligiga ega tarmoqlar uchun mo'ljallangan simsiz protokoldir. U odatda butun dunyo bo'ylab 2.4 GHz ISM diapazonida ishlaydi (ma'lum ilovalar uchun 868 MHz EI yoki 915 MHz AQSh diapazonlarida opsiyalari mavjud). Masofa nuqtai nazaridan, ZigBee qurilmalari atrof-muhit va antennaga qarab bir marta sakrash (hop) uchun odatda 10 dan 100 metrgacha bo'lgan kamtarona masofaga ega. Ochiq havoda ZigBee moduli to'g'ri ko'rish chizig'ida 300+ m ga yetishi mumkin, ammo to'siqlari bor sanoat muhitida o'nlab metr bo'lishi odatiy holdir. Biroq, ta'kidlanganidek, ZigBee to'r (mesh) tarmoqlarini tashkil qilishi mumkin, shuning uchun masofa oraliq tugunlar orqali ko'p marta sakrash (multi-hopping) bilan

uzaytirilishi mumkin. Foydalanilgan o'tkazish qobiliyati nuqtai nazaridan, ZigBee ning (2.4 GHz) xom ma'lumotlar uzatish tezligi 250 kbps ni tashkil qiladi. Protokol xarajatlaridan keyingi samarali o'tkazish tezligi pastroq, ammo datchik ma'lumotlari uchun yetarli (odatda bir necha bayt bo'ladi). U video yoki katta fayllarni uzatish kabi yuqori o'tkazish qobiliyatiga ega ehtiyojlar uchun mos emas, lekin davriy datchik telemetriyasi uchun yetarlidir. Kichik paketlar uchun bitta sakrash (hop) dagi ZigBee kechikishi juda past (o'nlab millisoniyadan bir necha yuz millisoniyagacha), bu monitoring va hatto ba'zi boshqaruv vazifalari uchun odatda yaxshidir. Bir nechta sakrashli (hop) to'r (mesh) tarmog'ida kechikish ortadi (har bir sakrash ishlov berish va kechikishni qo'shadi), lekin ZigBee odatda boshidan oxirigacha, aytaylik, 1 soniya yoki undan kam vaqtga toqat qiladigan ilovalarda ishlatiladi.

Quvvat sarfi

ZigBee past quvvat sarfiga asoslangan. Qurilmalar aloqalar o'rtasida uxlashi mumkin. Aytaylik, faqat daqiqada bir marta uzatadigan tugun bitta batareyada oylab yoki yillab bemalol ishlashi mumkin. Xabarlarini yuborish uchun yoniq turadigan marshrutizatorlar ko'proq energiya sarflaydi, ammo ZigBee radiolari, ayniqsa Wi-Fi yoki uyali aloqa bilan solishtirganda, odatda past tok kuchi talab qiluvchi qurilmalardir. Manbalardan birining ta'kidlashicha, ZigBee qurilmalari faol aloqa va masofani hisobga olganda Wi-Fi, Bluetooth Classic yoki LoRa ga qaraganda ancha past quvvat sarfiga ega. ZigBee ning ish sikli (duty cycle) qobiliyati va aloqa qisqa masofali ekanligi uning minimal energiya uchun optimallashtirilishi mumkinligini anglatadi.

LoRa va LoRaWAN

LoRa (Long Range - Uzoq masofa) juda past ma'lumotlar tezligida o'ta uzoq aloqa masofalariga erishish uchun odatda sub-GHz diapazonlarida (868 MHz, 915 MHz va boshqalar) ishlatiladigan fizik qatlam modulyatsiyasi texnologiyasi (chirp spread spectrum). LoRaWAN - bu aloqani yulduzlarning yulduzi (star-of-stars) topologiyasida (oxirgi qurilmalardan shlyuzlargacha) tashkil qiluvchi LoRa da qurilgan tarmoq protokoli qatlami. Masofa: LoRa uzoq masofaga ekanligi bilan mashhur, qishloq joylarda ochiq hududlarda to'g'ri ko'rish chizig'i bilan bir necha kilometr (hatto 10+ km) masofaga erishish mumkin. Ko'proq to'siqlar bo'lgan muhitda u hali ham ko'pincha 1-2 km yoki undan ko'proqni qamrab oladi va ZigBee ning odatiy masofasidan ancha oshib ketadi. Bu LoRa ni katta quyosh fermasi bo'ylab datchiklarni ulash yoki uzoqdagi quvur liniyasi datchiklarini markaziy xabga ulash kabi keng hududni qamrab olish uchun juda jozibador qiladi. Biroq, LoRa ning masofa bo'yicha afzalligi ma'lumotlar tezligi va ish sikli (duty cycle) qoidalaridagi

cheklovlar bilan keladi. O'tkazish qobiliyati/Ma'lumotlar uzatish tezligi: LoRa ma'lumotlarini uzatish tezligi ZigBee ga qaraganda ancha past. Tarqalish koeffitsiyenti va o'tkazish qobiliyati sozlamalariga qarab, LoRa o'zining eng tez, eng qisqa masofali konfiguratsiyasida ~0.3 kbps dan taxminan 50 kbps gacha qo'llab-quvvatlashi mumkin. Oddiy LoRaWAN sozlamalari bir necha kbps bo'lishi mumkin. Bu datchik ko'rsatkichlari va kichik xabarlar uchun yetarli, lekin tez-tez katta ma'lumotlarni uzatish uchun emas. LoRa real vaqtdagi audio yoki video kabi narsalar uchun mos emasligi aniq; u kam uchraydigan (sparse) telemetriya uchun mo'ljallangan. Kechikish: LoRaWAN odatda kamdan-kam (har bir necha daqiqa yoki soatda) hisobot beradigan qurilmalar uchun ishlatiladi. Tarmoq ko'pincha ish sikli cheklovlarini qo'yadi (masalan, Yevropada LoRa qurilmasi ma'lum diapazonlarda vaqtning atigi 1 foizida, ya'ni efirda soatiga ko'pi bilan 36 soniya ulanishi mumkin). Bu qoidalarga rioya qilish va ko'plab qurilmalarga diapazondan birgalikda foydalanishga ruxsat berish uchun qilingan. Natijada, LoRa past kechikishli uzluksiz boshqaruvga mos kelmaydi, qanday sozlanganligi va qurilmalar qanchalik tez-tez uyg'onishiga qarab soniyalardan tortib daqiqalargacha kechikishi mumkin. LoRaWAN da pastga yo'naltirilgan xabarlar (shlyuzdan qurilmaga) ham cheklangan (qurilmalar yuqoriga yo'naltirilgan ulanishidan keyin ma'lum darchalarda tinglashi kerak). Umuman olganda, LoRa vaqt bo'yicha muhim bo'lmagan ma'lumotlar uchundir.

Quvvat sarfi

LoRa ning foydasi shundaki, qurilma uzoq masofalarda shlyuzga yetib borishi mumkin, shu bilan birga modulyatsiya juda sezgir bo'lgani uchun nisbatan past uzatish quvvatidan (masalan, 25-100 mW) foydalanadi. Kamdan-kam uzatish bilan birgalikda, LoRa tuguni bitta batareyada yillar davomida ishlashi mumkin. Ba'zi taqqoslashlar shuni ko'rsatadiki, LoRa va SigFox (boshqa LPWAN) ma'lum bir qamrov hududi uchun eng kam quvvat sarfiga ega bo'lganlar qatoriga kiradi. Biroq, agar LoRa qurilmasi ma'lumotlarni juda tez-tez yuborishi kerak bo'lsa, har bir xabarning uzoq efir vaqti (past bit tezligi tufayli) aslida ancha ko'p energiya sarflashi mumkin. Lekin, odatda LoRa qurilmalari vaqti-vaqti bilan qisqa paketlarni yuboradi va boshqa vaqtlarda chuqur uyquda qoladi, bu esa batareyaning ko'p yillik ishlash muddatini beradi.

Sanoatga mosligi

Sanoat energetikasi muhitida ZigBee va LoRa turli bo'shliqlarga xizmat qiladi:

- ZigBee inshoot miqyosidagi tarmoqlar uchun, masalan, quyosh elektr stansiyasining boshqaruv hududida yoki zavod yoxud podstansiya ichida juda

mos keladi. Uning qisqa masofasi yetarlicha tugunlarni joylashtira olganingizda yoki hudud katta bo'lmaganda yaxshi va tezroq reaksiya beruvchi monitoring uchun uning yuqoriroq ma'lumotlar tezligidan foyda ko'rasiz. ZigBee (va WirelessHART yoki ISA100 kabi 802.15.4 ga asoslangan shunga o'xshash protokollar) qayta ishlash sanoatida simsiz asboblarni uchun keng qo'llanilgan, chunki ular oqilona masofani past quvvat va to'r (mesh) ishonchliligi bilan birlashtiradi. Masalan, WirelessHART (u ZigBee kabi fizik qatlamga asoslangan) ko'pincha neftni qayta ishlash zavodida kabellarsiz bosim/harorat ko'rsatkichlarini olish uchun ishlatiladi. ZigBee ning 2.4 GHz diapazoni shovqinli (Wi-Fi va h.k.) bo'lishi mumkin, ammo u ba'zi ilovalarda shovqinni yumshatish uchun DSSS (direct-sequence spread spectrum) va kanal bo'yicha sakrashdan foydalanadi. Shunga qaramay, og'ir metall yoki beton to'siqlar masofani cheklashi mumkin, shuning uchun sanoat sharoitida ehtiyotkorlik bilan joylashtirish yoki yaxshiroq kirib borish uchun sub-GHz ZigBee variantlari ishlatilishi mumkin.

- LoRa keng hududli va masofaviy o'rnatishlarda ajralib turadi. U keng hudud bo'ylab tarqalgan datchiklarni, masalan, taqsimlangan quyosh qurilmalarini yoki uzoqdagi o'lchash stansiyalarini zavodga qayta ulash uchun ishlatilishi mumkin. LoRa bir nechta relelar o'rniga barcha datchiklar bitta markaziy shlyuzga hisobot berishi uchun yirik quyosh fermasida ishlatilishi mumkin. Shuningdek, elektr stansiyasi atrofidagi atrof-muhit monitoringi (chang datchiklari, suv sathlari) kabi ssenariylarda LoRa infratuzilmani soddalashtirib, barcha nuqtalarni bitta tayanch stansiya bilan qamrab olishi mumkin. Biroq, zich joylashgan sanoat sharoitida LoRaWAN ni ehtiyotkorlik bilan rejalashtirish kerak: Tarmoq sig'imi yuqori emas (chunki har bir shlyuz vaqt birligida cheklangan miqdordagi xabarlarni qayta ishlay oladi, ko'pincha normal sharoitda daqiqasiga bir necha yuzta xabar), og'ir trafik yoki ko'plab qurilmalar, ayniqsa ish sikli cheklovlari mavjud bo'lganda, to'qnashuvlar yuzaga kelishi yoki xabarlar yo'qolishiga olib kelishi mumkin. Katta zavod kabi muhitda, agar ko'plab LoRa qurilmalari yoki boshqa ISM diapazoni qurilmalari mavjud bo'lsa (garchi LoRa ning kengaytirilgan spektri unga yaxshi chidamlilik bersa-da), LoRa aslida xalaqitlarga duch kelishi mumkin. Ochiq quyosh fermasida xalaqit kamroq muammo tug'diradi, ammo ish sikli va xabar hajmi siz qancha ma'lumot olishingiz mumkinligini hali ham cheklaydi (agar 1000 ta datchikning har biri har 10 daqiqada kichik paket jo'natsa bu yaxshi, lekin ularning har biri har 10 soniyada yuborsa bunday emas).

RF interferensiyasi va shovqin

Sanoat obyektlarida ko'pincha boshqa RF tizimlari (Wi-Fi, Bluetooth, uyali aloqa, mikroto'lqinli aloqalar) mavjud. 2.4 GHz chastotali ZigBee Wi-Fi bilan bo'lishishi kerak. Buni kanal tanlash (ZigBee 2.4 GHz da 16 ta kanalga ega, ularni qisman Wi-Fi kanallarini chetlab o'tish uchun sozlash mumkin) va odatda Wi-Fi nuqtalaridan bir oz masofada ishlaydigan ZigBee ning past quvvatli signallari orqali yumshatish mumkin. Sub-GHz diapazonidagi LoRa ISM diapazonidagi analog radiolar yoki boshqa LPWAN tarmoqlari kabi narsalar bilan to'qnash kelishi mumkin, ammo umuman olganda bu diapazonlar 2.4 GHz ga qaraganda kamroq band. Tarqalish xususiyatlari farqlanadi: 2.4 GHz devorlar va metall ta'siriga ko'proq uchraydi (yuqori chastota, ko'proq so'nish), sub-GHz esa uzoqroqqa boradi va to'siqlardan yaxshiroq o'tadi (shuning uchun masofa va binolarga kirishda LoRa ustunligi mavjud). Shunday qilib, beton konstruksiyali elektr stansiyasida, agar ZigBee oraliq sakrashlardan (hop) foydalanmasa, LoRa ZigBee o'ta olmaydigan joylardan o'tishi mumkin.

Kechikish ehtiyojlari

Agar ilova deyarli real vaqtdagi boshqaruvni (soniyadan kam) talab qilsa, na ZigBee, na LoRa simli yoki Wi-Fi kabi tezkor emas, lekin ZigBee ehtimol 100 ms dan bir necha yuz ms gacha kechikishni boshqara oladi, bu ba'zi nazorat boshqaruvi uchun maqbul bo'lishi mumkin (masalan, harorat chegarasiga asoslangan quyosh invertori uchun sovutish foniyini yoqish). LoRa ning kechikishi har qanday tezkor boshqaruv uchun odatda juda yuqori, u ko'proq monitoring qilish va ehtimol vaqt muhim bo'lmagan boshqaruv buyruqlarini yuborish uchun mo'ljallangan (masalan, keyingi bir necha daqiqa ichida valfni ochishni rejalashtirish).

O'tkazish qobiliyati va ma'lumotlar hajmi

Agar siz, aytaylik, qurilmadan to'lqin shakli yoki batafsil ishlash jurnalini yuborishingiz kerak bo'lsa, ZigBee kilobaytlarni nisbatan tezroq yuborishi mumkin (garchi haqiqatan ham katta ma'lumotlar (big data) uchun ideal bo'lmasa ham), holbuki LoRa juda sekin bo'ladi. ZigBee ning 250 kbps va LoRa ning bir necha kbps tezligi ushbu farqni ta'kidlaydi. Masalan, 1 kilobaytlik xabarni uzatish ZigBee da ~32 ms (qo'shimcha sarflar bilan) olishi mumkin, lekin LoRa da taxminan 3 soniya (ma'lumotlar tezligiga qarab) olishi mumkin. Shuning uchun ham narsalarni samarali saqlash maqsadida LoRaWAN foydali yuk o'lchamlarini cheklaydi.

Qurilmaning murakkabligi va narxi

Hozirda ham ZigBee, ham LoRa modullari ancha arzon (radio uchun bir necha dollar). ZigBee steklari dasturiy ta'minot nuqtai nazaridan murakkabroq (to'r (mesh) tarmog'ini yaratish, marshrutlash jadvalarini yuritish). LoRaWAN steklari ham murakkablikka ega (uzatishlar va shifrlash jadvalini boshqarish va h.k.), ammo oxirgi qurilmalar ancha sodda bo'lishi mumkin. LoRa modullari ko'pincha murakkablikning bir qismini tarmoq serveriga yuklaydi (LoRaWAN serveri tasdiqlashlarni, rejalashtirishni va hokazolarni boshqaradi). Integratsiya nuqtai nazaridan: ZigBee qurilmalari odatda tarmoqqa kiritilishi kerak (koordinatori bilan bog'langan holda), LoRa qurilmalari esa tarmoqqa ulanish uchun shunchaki LoRa shlyuzining ruxsat etilgan masofasida bo'lishi va to'g'ri manzilga yo'naltirilgan bo'lishi kerak (ruxsatnomalar mos kelsa). LoRa markaziy server bilan ko'proq bir tomonlama telemetriya kabi ishlaydi; ZigBee o'z tarmog'ida ko'proq tengdoshlar o'rtasida (peer-to-peer) ishlash qobiliyatiga ega.

Sanoat energetikasida biz shuningdek WirelessHART (2.4 GHz, ZigBee ga o'xshash, lekin sanoat asboblari uchun maxsus) va telemetriya uchun mulkiy sub-GHz FHSS radiolari (ehtimol 433 MHz yoki maxsus protokollar bilan 915 MHz da ishlaydigan ba'zi "RF" tizimlari) kabi protokollarni ko'ramiz. Ular ko'pincha masofa va ma'lumotlar tezligi o'rtasidagi muvofiqlik (trade-off) jihatlari, batareyaning ishlash muddati va boshqalar kabi shunga o'xshash mulohazalarga ega. Umumiy kuzatish shundan iborat: ZigBee va shunga o'xshash 2.4 GHz to'r (mesh) tarmoqlari past quvvat va past kechikishga ega, ammo qisqa masofani qamrab oladi, holbuki LoRa (va SigFox va boshqalar) kamdan-kam aloqa qiluvchi juda kam quvvatli qurilmalar uchun mos bo'lib, o'tkazish qobiliyati va ba'zi kechikishlar evaziga uzoq masofalarni qamrab oladi. Haqiqatan ham, keng qamrovli ko'rib chiqishda ZigBee va LoRa qishloq xo'jaligi uchun (va qisman kam aloqaga ega boshqa IoT muhitlari uchun) eng mos simsiz protokollar qatoriga kiritilgan, chunki ularning quvvat sarfi kam, masofasi yetarli (ZigBee uchun o'rtacha, LoRa uchun uzoq) va datchiklar uchun sodda. ZigBee obyekt ichidagi tarmoqlar uchun kichik o'lcham va past kechikish afzalligi bilan "maqbul" masofani taklif qiladi, LoRa esa keng qamrov uchun ancha uzoqroq masofani taklif qiladi.

Sanoat energiya muhitida moslik

- ZigBee: Zavod yoki podstantsiya ichida monitoring qilish uchun ajoyib. Masalan, neftni qayta ishlash zavodi xavfli hududdagi datchiklardan 50 metr uzoqlikdagi boshqaruv xonasiga simsiz ma'lumotlarni olish uchun ZigBee (yoki ISA100) dan foydalanishi mumkin. Quyosh fermasida ZigBee ma'lum bir

bo'limdagi barcha kuzatuvchi kontrollerlarni ulashi mumkin, shunda ular uzoq boshqaruv kabellarisiz harakatni muvofiqlashtiradi. ZigBee, shuningdek, aqlli energiya uyi tarmoqlarida (past quvvat sarfi va to'r (mesh) qobiliyati tufayli aqlli hisoblagichlarni, termostatlarni va hokazolarni ulashda) ishlatiladi.

- LoRa: Masofaviy aktivlarni ulash uchun ideal, masalan, tarmoqdagi ustunga o'rnatilgan transformatorlarning markaziy stansiyaga holatni yuborishi yoki katta quyosh fermasi atrofida joylashgan kamyob ob-havo datchiklarining operatsiyalar markazidagi yagona shlyuzga xizmat ko'rsatishi. LoRa shuningdek binolarga yoki er osti omborlariga yaxshiroq kirib bora oladi, shuning uchun u kommunal xizmatlarni hisobga olish uchun ishlatilishi mumkin (ba'zi aqlli shahar qurilmalari butun shahar bo'ylab suv/gaz hisoblagichlarini o'qish uchun LoRa dan foydalanadi). Yuqori kuchlanishli muhitda LoRa datchikning simsiz aloqa qilishiga imkon beradi (shu bilan birga o'ziga xos izolyatsiyani ta'minlaydi). Masalan, yuqori kuchlanishli liniyaning osilib qolishi yoki haroratini kuzatuvchi datchik yuqori kuchlanishni ushlab olishi mumkin bo'lgan simli ulanishsiz ma'lumotlarni yerga yuborish uchun LoRa dan foydalanishi mumkin.

Shuningdek, me'yoriy talablarga muvofiqlikni ham hisobga olish kerak: ZigBee va LoRa ikkalasi ham litsenziyasiz diapazonlardan foydalanadi, ammo sanoat obyektlari ba'zida kafolatlangan shovqinsiz (interference-free) ishlash uchun litsenziyaga ega diapazonli radiolarni tanlaydi. An'anaviy litsenziyalangan RF (litsenziyalangan tor diapazonli radiolar kabi) muhim tizimlar uchun ishonchli aloqani taklif qilishi mumkin, ammo yuqoriroq narx va quvvat bilan. ZigBee/LoRa odatda muhim bo'lmagan monitoring uchun (yoki zaxira sifatida) ishlatiladi.

Xulosa qilib aytganda, ZigBee va LoRaga solishtirganda:

- Masofa: LoRa >> ZigBee (har bir sakrash (hop) uchun kilometrlar yoki o'nlab metrlar).
- Quvvat: Ikkalasi ham kam quvvatli; ZigBee har bir xabar uchun juda kam quvvat sarflaydi, lekin masofa uchun to'r (mesh) marshrutizatorlarga muhtoj; LoRa har bir xabar uchun bir oz ko'proq quvvat sarflaydi, lekin bitta sakrash (hop) bilan uzoqqa yetib borishi mumkin va uzoq uyqu oraliqlari tufayli batareyaning uzoq xizmat qilish muddatiga erisha oladi. ZigBee ko'pincha qisqa masofali ehtiyojlar uchun kamroq quvvat sarfiga ega deb keltiriladi, LoRa ham past quvvat sarflaydi, ammo efir vaqti bilan cheklangan.
- Kechikish: ZigBee << LoRa (ZigBee javoblari tezroq, LoRa da soniyalar davom etadigan tabiiy kechikish bo'lishi mumkin).
- O'tkazish qobiliyati: ZigBee >> LoRa (yuzlab kbps va bir necha kbps).

- Tarmoqqa ulanish: ZigBee to'r (mesh)ni qo'llab-quvvatlaydi, bu to'siqlari bo'lgan mahalliy hududda qamrov uchun yaxshi; LoRa yulduz topologiyasidan foydalanadi (har bir tugundan shlyuzgacha) va qamrov uchun sof masofaga tayanadi.
- Sanoatda qabul qilinishi: ZigBee (va uning o'xshashlari) ko'pincha zavodlar ichida, LoRa ko'pincha IoT qoplamalari (overlays) va keng hududli datchiklar tarmoqlari uchun.

Savol Javoblar - Simsiz protokollar:

- *1-savol: Agar har 5 daqiqada panel harorati haqida hisobot berish uchun 5 km² quyosh fermasi bo'ylab datchiklarni o'rnatishingiz kerak bo'lsa, qaysi simsiz texnologiyaga (ZigBee yoki LoRa) tayanardingiz va nima uchun? Masofa va tarmoq sig'imini hisobga oling.*
- *2-savol: Wi-Fi trafiki ko'p bo'lgan zavod sharoitida sub-GHz simsiz datchiklar tarmog'i 2.4 GHz li tarmoqdan qanday afzalliklarga ega bo'lishi mumkin? Ushbu stsenariyda LoRa kabi protokoldan foydalanishning mumkin bo'lgan kamchiliklari nimalardan iborat?*

12.3 Xavfli muhitlarda o'lchash

Sanoat o'lchovlari ko'pincha xavfli muhitlarda, yonuvchi gazlar yoki chang, yuqori kuchlanish darajalari, ekstremal haroratlar yoki korroziv kimyoviy moddalar mavjud bo'lgan joylarda amalga oshirilishi kerak. Ushbu sharoitlar odamlar uchun ham, asbobsozlik uchun ham xavfsizlik risklarini tug'diradi. Maxsus dizayn usullari va standartlari bunday og'ir sharoitlarda o'lchov tizimlarining xavfsiz va ishonchli ishlashini ta'minlaydi.

Portlovchi muhitlar: ATEX/IECEX muvofiqligi

Ko'pgina sanoat obyektlarida (neft va gazni qayta ishlash zavodlari, kimyo zavodlari, don siloslari, batareyalar saqlanadigan xonalar) muhitda yonib ketishi mumkin bo'lgan yonuvchi moddalar bo'lishi mumkin. Asbobdan chiqadigan kichik uchqun yoki issiq sirt portlashga olib kelishi mumkin. Buning oldini olish uchun uskunalar qat'iy standartlarga javob berishi kerak. ATEX - bu portlovchi muhitda ishlatiladigan uskunalar qo'yiladigan talablarni belgilovchi Yevropa Ittifoqi direktivalari to'plami (fransuzcha "ATmosphères EXplosibles" so'zidan olingan). IECEX - bu Xalqaro elektrotexnika komissiyasi (IEC) tomonidan ayni shu maqsadda

yaratilgan global sertifikatlash sxemasi. Har ikki tizim xavfli hududlarni portlovchi muhit mavjud bo'lish ehtimoliga ko'ra zonalar bo'yicha tasniflaydi:

Zona 0 (Gaz) / Zona 20 (Chang): Portlovchi muhit doimiy ravishda yoki uzoq muddat davomida mavjud bo'ladi (masalan, erituvchi idishining ichida yoki don silosi bo'shlig'ida). Bu yerda faqat eng yuqori xavfsizlik toifasidagi asboblar (ATEX bo'yicha 1-toifa) bir nechta himoya choralari bilan ishlatilishi mumkin.

Zona 1 / Zona 21: Oddiy ish paytida portlovchi muhit yuzaga kelishi mumkin (masalan, vaqti-vaqti bilan oqishi mumkin bo'lgan neftni qayta ishlash zavodi nasos muhri yonida). 2-toifali uskunalar talab qilinadi, ular bitta nosozlik sharoitida ham xavfsiz hisoblanadi.

Zona 2 / Zona 22: Oddiy ish paytida portlovchi muhit ehtimoli kam, yoki faqat qisqa muddatlarga yuzaga keladi (masalan, faqat qochqin bo'lgandagina gazni ko'radigan shamollatish hududi). Oddiy ishlash sharoitlarida xavfsiz bo'lgan 3-toifali uskunalaridan foydalanishga ruxsat beradi.

Amaliyotda bu tasniflar shuni anglatadiki, bunday zonalarga o'rnatilgan har qanday datchik yoki qurilma atrofdagi aralashmani yondira olmaydigan qilib loyihalashtirilishi va sertifikatlangan bo'lishi kerak. Asbobsozlik muhandisining blogida tushuntirilganidek, ushbu hududlardagi asbob har qanday portlashni ushlab qolish yoki uni keltirib chiqarish uchun yetarli energiya ishlab chiqarmaslik orqali ateşleme manbalarini (ignition sources) yo'q qiladigan xususiyatlarga ega bo'lishi kerak.



Rasm 56: zonalarning tasvirlanishi (ATEX bo'yicha)

O'z-o'zidan xavfsizlik (Intrinsic Safety) (Ex i)

Asosiy himoya usullaridan biri o'z-o'zidan xavfsizlikdir. O'z-o'zidan xavfsiz asbob shunday qurilganki, u hatto nosozlik sharoitida ham xavfli muhitni yoqish uchun yetarli bo'lgan elektr yoki issiqlik energiyasini ajrata olmaydi. Bu odatda zanjirlar kuchlanish va tok kuchi bo'yicha cheklanganligini, odatda energiyani cheklaydigan simlarda xavfsizlik to'siqlari (zener diodi to'siqlari yoki galvanik izolyatorlar) yordamida amalga oshirilganligini anglatadi. Masalan, odatiy o'z-o'zidan xavfsiz datchik zanjiri hatto qisqa tutashuv yoki sakrash ham xavfli hududga, aytaylik, 30 mA yoki 24 V dan ortiq energiya yubormasligini ta'minlaydi va har qanday komponent nosozliklari uchqun yoki gazning yonish nuqtasidan yuqori haroratni keltirib chiqarmaydi. Ta'riflanganidek, o'z-o'zidan xavfsiz asboblarning "uchqun chiqarish uchun yetarli kuchlanish yoki atrofdagi zarrachalar yonishini keltirib chiqarish uchun yetarli issiqlik ishlab chiqarmaydi". Bu ko'pincha komponentlarni ehtiyotkorlik bilan tanlashni va zaxiralangan xavfsizlik xususiyatlarini o'z ichiga oladi, masalan, tok kuchini cheklovchi rezistorlar, saqlagichlar (fuses), harorat o'chirgichlari. Asboblarning salqin turishi kerak; hatto eng yomon nosozlik holatida ham sirt harorati gazning o'z-o'zidan yonish haroratidan past bo'lishi kerak (Harorat toifalari T3 = maks. 200°C va hokazo sifatida belgilanadi va uskunalarning shunga mos ravishda baholanadi).

Portlashga qarshi (Olovga qarshi, Ex d)

Boshqa usul - portlashga qarshi korpuslardan foydalanishdir. Bu shuni anglatadiki, asbob gazning ichki portlashiga bardosh bera oladigan va uning tashqariga tarqalmasligi uchun uni o'chiradigan kuchli korpusga (odatda quyma metall) joylashtiriladi. Boshqacha qilib aytganda, agar yonuvchi gaz korpusga kirib, alangalansa (balki kalitdan chiqqan uchqun tufayli), korpus uni o'z ichiga oladi, olov tashqi muhitni yoqish uchun qochib qutula olmaydi. Bunday korpuslardagi tishli yoki gardishli birikmalar chiqib ketayotgan gazlarni sovutish uchun aniq tayyorlangan bo'ladi. Portlashga qarshi (ko'pincha olovga qarshi - flameproof deb ataladi) uskunalar hajmli va og'ir bo'lishi mumkin, lekin siz "oddiy" ichki komponentlardan foydalanishingiz mumkin, chunki himoya saqlash (containment) orqali amalga oshiriladi. Masalan, portlashga qarshi birlashma qutisi 1-zonada simlarni maxsus o'z-o'zidan xavfsiz (IS) zanjirlarsiz ulash imkonini berishi mumkin, chunki ichkarida uchqun paydo bo'lsa ham, u tashqi gazni yoqmaydi. Neftni qayta ishlash zavodlaridagi ko'plab motorlar, yoritish moslamalari va hatto asboblarning korpuslari shu turga kiradi.

Boshqa himoya usullari

Portlovchi gaz kirib kelishiga yo'l qo'ymaslik uchun korpus ichida bosimli inert gazni saqlab turuvchi tozalash/bosim o'tkazish (Ex p) yoki moyga botirish (Ex o) va hokazolar kabi boshqa usullar ham mavjud. Asboblarning uchun keng tarqalgan usullardan biri kapsulalashdir (Encapsulation, Ex m) – elektronika smolaga joylash, bu har qanday yoyni ichkarida ushlab qoladi va unga tashqaridan hech qanday gaz yetib olmaydi. Shuningdek, 2-zona uchun uchqun chiqarmaydigan (Ex n) uskuna oddiy ishlash jarayonida uchqun chiqmasligini ta'minlaydi (lekin IS yoki Ex d talab qilganidek nosozlik holatida albatta xavfsiz bo'lishi shart emas). Har bir usul o'z standartlariga (IEC 60079 seriyasi) va o'ziga xos foydalanish holatlariga ega.

Amalda, xavfli hudud uchun o'lchov tizimini loyihalashda muhandislar ko'pincha kombinatsiyadan foydalanadilar: masalan, xavfsiz hududdagi o'z-o'zidan xavfsizlik to'sig'i xavfli hududdagi datchikni quvvatlantiradi. Qo'shimcha xavfsizlik uchun bu datchik ham portlashga qarshi bo'lishi mumkin. Dizayn xabardor qilingan organlar tomonidan sertifikatlangan bo'lishi kerak. Asboblardagi ATEX/IECEx belgilari himoya qilish usulini, gaz guruhini, harorat toifasini va h.k. ni ko'rsatadi. Masalan, bosim o'zgartirgichi Ex ia IIC T4 Ga deb belgilanishi mumkin, ya'ni o'z-o'zidan xavfsiz, gaz guruhi IIC (vodorod/asetilen bo'lishi mumkin), Harorat toifasi T4 ($\leq 135^{\circ}\text{C}$), Zona 0 uchun uskuna (Ga).

Masofadan o'lchash usullari

Strategiyalardan biri o'lchovni xavfli vositadan imkon qadar jismoniy jihatdan ajratishdir. Masalan, xavfli gaz muhitidagi elektr datchik o'rniga, hududga elektr zanjiri o'tmaydigan optik tola datchigi yoki pnevmatik o'lchagichdan foydalaning. Optik tolali harorat yoki kuchlanish datchiklari mahalliy darajada hech qanday elektr quvvatisiz yuqori kuchlanishli yoki portlovchi joylarda ishlashi mumkin (so'rovchi (interrogator) tola orqali yorug'lik yuboradi, hatto yuqori kuchlanish zonalarida ham shisha tola hech narsani yondirmaydi va EMI ga immunitetga ega). Ushbu masofaviy datchik prinsipi ko'pincha yuqori kuchlanishli muhitlarda qo'llaniladi: masalan, yerga optik signal yuboradigan, har qanday to'g'ridan-to'g'ri elektr aloqasidan qochadigan optik CT (tok kuchi o'zgartirgichi) yordamida HV (yuqori kuchlanish) liniyasida tok kuchini o'lchash.

Yuqori kuchlanishni o'lchash muhitida elektr toki urishi yoki yoy paydo bo'lish xavfi mavjud. Datchiklar to'g'ri izolyatsiyaga, siljish masofalariga ega bo'lishi va signallarni tashqariga chiqarish uchun ko'pincha izolyatsiya kuchaytirgichlari yoki tolali ulanishlardan foydalanishi kerak. Masalan, 1000 kV lik uzatish liniyasidagi kuchlanishni o'lchash uchun sig'imli bo'luvchi yoki optik Pockels katagi datchigidan foydalanish mumkin, o'qish tola orqali yerga uzatiladi. Yoki simsiz aloqadan foydalaning: ma'lumotlarni yerga yuboradigan liniyaga kichik LoRa uzatgichni ulang, shu orqali yuqori kuchlanishni pastga tushirishi mumkin bo'lgan sim bo'lmaydi. Bu faol rivojlanayotgan sohadir (kuchlanish ostidagi zanjirlarga qisqich qilib ulanadigan va liniya maydonidan yig'ilgan energiya bilan quvvatlanib, ma'lumotlarni simsiz yuboradigan aqlli tarmoq datchiklari). Datchik qadoqlanishi elektr maydoni ta'siriga (stressiga) bardosh berishi va korona yoki qisman zaryadsizlanishni kiritmasligi kerak.

Yuqori haroratli muhitlar

Pechlar, qozonlar yoki dvigatellarda o'lchash issiqlikdan omon qoladigan va jarayonni buzmaydigan datchiklarni talab qiladi. Masalan, termoparalar juda yuqori haroratga (platina turlari bilan $\sim 1700^{\circ}\text{C}$ gacha) bardosh bera oladi, lekin siz ularning simlari va ulanishlarini himoya qilishingiz kerak. Ko'pincha ular jarayonga kiritilishi mumkin bo'lgan himoya quvurlari bo'lgan termoquduqlarga (thermowell) joylashtiriladi. Termoquduqlar va datchik korpuslari issiqlikka ham, ehtimoliy korroziv muhitga ham bardosh bera oladigan materiallardan (pech harorati uchun Inconel yoki keramika kabi) tayyorlanishi kerak. Shuningdek, termal kengayishni hisobga olish va agar u bosim chegarasi bo'lsa, oqish yo'qligini ta'minlash kerak.

Yuqori haroratda datchiklarni kalibrlash murakkab (etalon nuqtalar yoki qattiq erish nuqtalari yordamida joyida kalibrlash kerak bo'lishi mumkin). Uzluksiz yuqori haroratda foydalanish uchun siljish sezilarli bo'lishi mumkin (platina RTD lari siljishi, metallurgik o'zgarishlar tufayli termoparalar kalibrlashdan chiqib ketishi mumkin), shuning uchun muntazam almashtirishni yoki vaqti-vaqti bilan kiritiladigan etalon datchik bilan taqqoslash orqali kalibrlash tekshiruvlarini rejalashtirish mumkin. Quyosh-issiqlik stansiyalarida (suyuqliklar $400^{\circ}\text{C}+$ bo'lishi mumkin bo'lgan joylarda) ko'plab harorat va oqim sarfi datchiklari ushbu toifaga kiradi, agar elektronika muhitga bardosh bera olmasa, ular yuqori haroratga chidamli muhrlarga va ehtimol faol sovutishga (suv bilan sovutiladigan zond) ega bo'lishi kerak.

Kimyoviy jihatdan agressiv muhitlar

Korroziv kimyoviy moddalar (kislotalar, xlor gazi, vodorod sulfidi, sho'r suv va boshqalar) standart datchik materiallarini tezda yo'q qilishi mumkin. Bu yerda material tanlash muhim ahamiyatga ega, jarayon ta'siriga uchragan har qanday qism uchun ekzotik qotishmalardan (Hastelloy, Monel, titan) yoki himoya qoplamalaridan (Teflon, keramika) foydalaning. Masalan, og'ir kimyoviy jarayonlardagi pH datchiklari ko'pincha sezgir elektrodlarni to'g'ridan-to'g'ri hujumdan ajratib turadigan himoya korpuslari va tuz ko'priklariga ega bo'ladi. Bosim o'zgartirgichlarida yog' bilan to'ldirilgan diafragma muhrlari bo'lishi mumkin: diafragma (korroziyaga chidamli qotishmadan yasalgan yoki qoplangan) jarayon suyuqligi ta'siriga uchraydi, haqiqiy datchik esa uning orqasida joylashgan va to'ldiruvchi suyuqlik bilan himoyalangan. Agressiv muhitda texnik xizmat ko'rsatish davrlari ko'payadi, datchiklar xavfli ravishda ishlamay qolishidan oldin ko'proq tekshirilishi va almashtirilishi mumkin. Shuningdek, ba'zan zaxiralash qo'llaniladi (korroziya tufayli bittasi ishdan chiqishi mumkin bo'lgan joyda ikkita datchik va tizim texnik xizmat ko'rsatishni rejalashtirayotganda boshqasida ishlashni davom ettirishi mumkin).

Amalda o'z-o'zidan xavfsizlik (Intrinsic Safety) (misol)

Aytaylik, vodorod saqlash tankida (vodorod yonuvchan bo'lib, bizda 1-zonali tasniflangan hudud mavjud) gaz bosimini o'lchashimiz kerak. Biz Ex ia (o'z-o'zidan xavfsiz) sertifikatiga ega bosim o'zgartirgichini tanlashimiz mumkin. Biz uning simlarini xavfsiz hududdagi o'z-o'zidan xavfsizlik to'sig'i moduli orqali o'tkazamiz. Bu to'siq hatto nosozlik holatida ham kabeldagi energiya cheklanganligini ta'minlaydi. O'zgartirgichning o'zi shunday ishlab chiqilganki, uning zanjirlari hech qachon uchqun yoki yuqori issiqlik chiqarmaydi. Korpus ham portlashga qarshi

bo'lishi yoki hech bo'lmaganda gaz oson kirib chiqa olmasligi uchun germetik muhrlangan bo'lishi mumkin. Ushbu konfiguratsiya bilan, hatto datchik yoki kabelda nosozlik yuz bersa ham, u vodorodni yoqmaydi. O'z-o'zidan xavfsizlikning salbiy tomoni shundaki, quvvat mavjudligi biroz pastroq, siz IS zanjirlari bilan katta motorlarni yoki yuqori tok kuchi qurilmalarini ishlata olmaysiz. Ammo datchiklar uchun bu mukammal (ularga faqat millivattlar kerak). Mensor blogi ta'kidlashicha, hatto nosozlik bo'lsa ham o'z-o'zidan xavfsiz bo'lishi uchun asboblarning ko'pincha zaxira xavfsizlik xususiyatlariga ega bo'ladi, masalan, birinchisi ishlamay qolganda ikkinchi tok kuchini cheklovchi. Va agar ichida batareya kabi biror narsa bo'lsa (qo'lda olib yuriladigan kalibratorda bo'lgani kabi), u hech qachon uchqun chiqarmasligi yoki qizib ketmasligi uchun himoyalangan bo'lishi kerak.

Xavfli hududlarda masofaviy telemetriya

Nafaqat datchiklar xavfsiz bo'lishi, balki ularning ma'lumotlarini uzatish ham ko'pincha xavfsiz bo'lishi kerak. Xavfli hududlar uchun mo'ljallangan simsiz uzatgichlar mavjud, masalan, WirelessHART harorat o'zgartirgichlari ko'pincha Ex ia bahosiga ega. Ular ma'lumotlarni simli ulanishlarsiz yuborishi mumkin, bu ajoyib, chunki to'g'ri bajarilmasa, sim yotqizishning o'zi uchqunlar uchun yo'l bo'lishi mumkin. Simsiz qurilmalar xavfli zonalar bo'ylab uzoq kabellarni yotqizish zaruratini yo'q qiladi (har bir kabelning kirib borishi potentsial qochqin yoki atesleme (ignition) yo'lidir). Biroq, har qanday simsiz qurilmada hali ham elektronika va batareya mavjud, shuning uchun u boshqa har qanday qurilma kabi sertifikatlangan bo'lishi kerak. Ko'pchiligida energiyasi cheklangan dizaynlar va portlashga qarshi batareya bo'linmalari mavjud. Masofaviy telemetriya kengroq ma'noda operatorlarni xavfli hududlardan uzoqroq tutishingizni anglatadi. Toksik gaz tarmog'idagi o'lchagichni to'g'ridan-to'g'ri o'qish o'rniga, datchik ko'rsatkichlarni boshqaruv xonasiga uzatadi. Bu xodimlarga ta'sir qilishni minimallashtirish orqali xavfsizlikni yaxshilaydi.

Yuqori kuchlanishli/yuqori tok kuchli muhitlar

Bular portlash emas, balki elektr toki urishi, yoy hosil bo'lishi va elektromagnit xalaqitlar kabi boshqacha xavfni yuzaga keltiradi. Yuqori kuchlanishli hududlardagi (masalan, 500 kV liniyalik podstantsiya hovlisida) asboblarning ehtiyotkorlik bilan izolyatsiya qilingan bo'lishi kerak. Ko'pincha asbobning o'zi ekranlangan korpusda yoki yuqori kuchlanishdan uzoqda, vositachi qurilmalar orqali o'lchaydigan bo'lishi mumkin. Masalan, HV liniyasida tok kuchini o'lchash tok kuchi transformatori (CT) orqali amalga oshiriladi. CT ikkilamchi tomoni tok kuchining izolyatsiyalangan,

past kuchlanishli tasvirini beradi, uni boshqaruv binosida asboblar xavfsiz o'qiy oladi. Kuchlanish o'lchovi ham xuddi shunday kuchlanish transformatorlari yoki bo'luvchilardan foydalanadi. Agar kimdir liniyada to'g'ridan-to'g'ri datchik (masalan, o'tkazgichga biriktirilgan faza o'lchash bloki) bo'lishini xohlasa, u yerga ko'prik bo'ladigan to'g'ridan-to'g'ri simli ulanishdan qochish uchun katta ehtimol bilan simsiz aloqa qiladi. Asbob shuningdek kuchli elektromagnit maydonlarga dosh berishi kerak. HV uskunasi yaqinidagi ko'plab qisman zaryadsizlanish yoki korona shovqin kiritishi mumkin; shunday qilib, aniqlikni saqlash uchun datchiklar ekranlash va filtrlashga muhtoj. Bundan tashqari, HV yaqinidagi har qanday elektronika sakrashlar (chaqmoq yoki ulab-uzishdan) ehtimolini bartaraf eta olishi kerak. Zanjirlarda keskin sakrashlarni so'ndirgichlar va kuchli izolyatsiya (optoizolyatorlar, transformatorlar) ishlatiladi.

Ekstremal haroratlar va muhitlar (xulosa)

Atom elektr stansiyalarida yoki koinotdagi ilovalarda (ekstremal radiatsiya) datchiklar qo'shimcha maxsus dizaynlarni talab qiladi (radiatsiyaga chidamli elektronika va boshqalar), ammo bu odatiy sanoat miqyosidan tashqarida.

Nihoyat, og'ir muhitdagi har qanday o'lchovni texnik xizmat ko'rsatish nuqtai nazaridan ko'rib chiqish kerak: Masalan, 0-zonadagi datchikni qanday kalibrlash mumkin? Odatda siz uni xavfsiz hududga olib chiqishingiz kerak bo'ladi. Shuning uchun ba'zida "kalibrlash kameralari" quriladi, u yerda siz sinov signalini xavfsiz kiritishingiz mumkin. Yoki zaxira datchiklar bittasini olib tashlashga imkon beradi, boshqalari esa monitoringni davom ettiradi.

Standartlar bularning barchasiga yo'l-yo'riq ko'rsatishga yordam beradi: portlovchi muhitlar uchun IEC 60079 seriyasi, Shimoliy Amerikada xavfli joylarni tasniflash uchun NFPA 70 (NEC) 500/505-modda (Division 1, 2 ni zonalarga solishtirganda shunga o'xshash tushuncha). ISA xavfli hududlarda o'z-o'zidan xavfsizlik va sim yotqizish bo'yicha tavsiya etilgan amaliyotlarni nashr etadi. NACE standartlari korroziyali muhitlar uchun material tanlashni qamrab oladi.

Xulosa qilib aytganda, xavfli muhitlarda o'lchash tegishli texnologiya (sharoitlarda omon qoladigan yoki xavfsiz bo'lishi mumkin bo'lgan datchiklar) va xavflarni yo'q qiladigan standartlar hamda dizayn tamoyillariga rioya qilishning kombinatsiyasini talab qiladi. O'z-o'zidan xavfsizlik uchqun chiqmasligini ta'minlaydi; portlashga qarshi korpuslar har qanday uchqunni o'z ichiga oladi; masofaviy va elektrsiz o'lchash usullari xavflarni chetlab o'tadi. Yuqori kuchlanish o'lchovlari izolyatsiyaga va har qanday nosozlikni boshqaruv tizimlariga o'tishining oldini olishga qaratilgan. Yuqori harorat va kimyoviy o'lchovlar datchikning

mustahkamligiga va siljishni boshqarishga qaratilgan. Bularning barchasi ko'pincha himoya qatlamlarini qo'shish yoki ozgina qulaylikni qurbon qilishni anglatadi (termoquduq yoki signal quvvatini cheklaydigan to'siqlar tufayli biroz sekinroq javob berish kabi), ammo ular odamlar va aktivlarni himoya qilish uchun muhimdir. Dizayn shunday taxmin ostida amalga oshirilishi kerakki, agar biror narsa noto'g'ri ketsa (yonish, qisqa tutashuv, ta'sir), oxir-oqibat u sodir bo'ladi, shuning uchun o'lchov tizimi hatto nosozlik stsenariylarida ham xavfli oqibatlarning oldini olishi kerak.

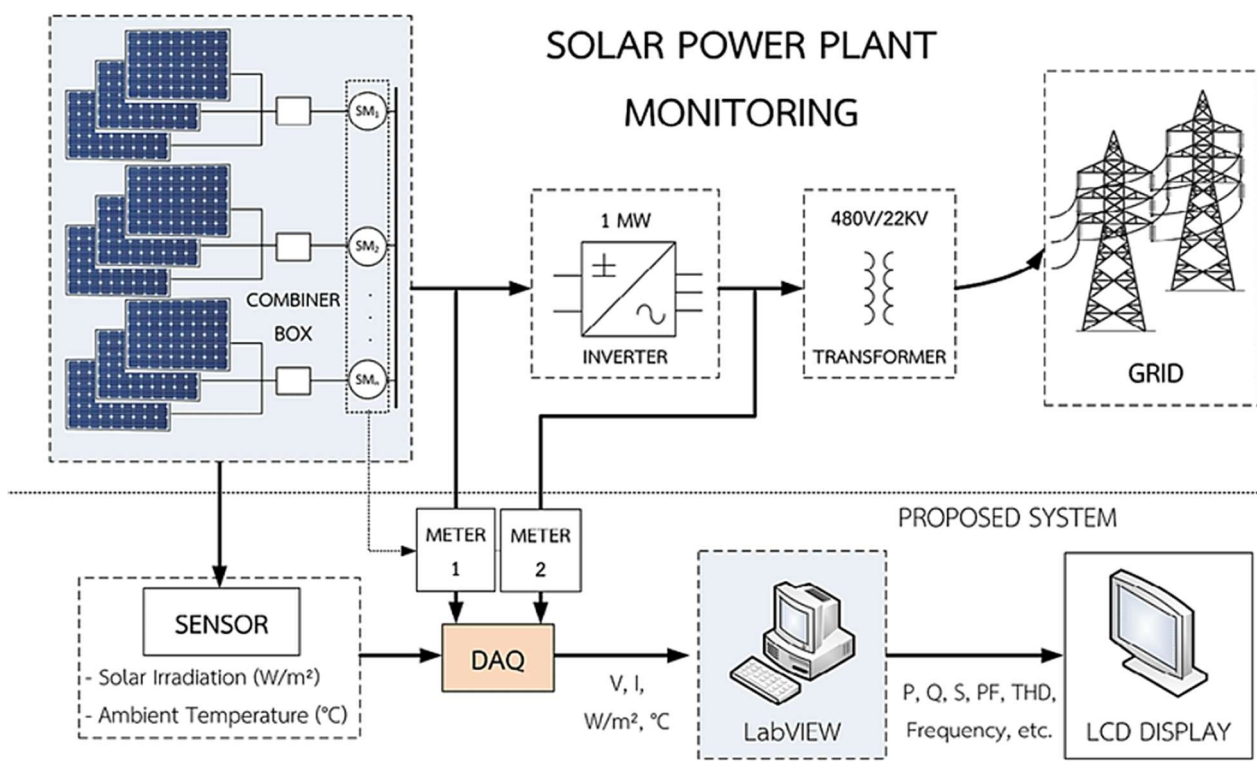
Savol Javoblar - Xavfli muhit asbobsozligi:

- *1-savol: O'z-o'zidan xavfsizlik tamoyili nima va u portlashga qarshi korpusdan qanday farq qiladi?*
- *2-savol: Ham yuqori harorat, ham portlovchi gaz bilan bog'liq vaziyatda parametrlarni (masalan, harorat yoki kuchlanish) qanday o'lchashingiz mumkinligiga misol keltiring. Qanday usullar kombinatsiyasi xavfsizlik va aniqlikni ta'minlaydi?*

13. Energiya va sanoat tizimlarida asbobsozlik

13.1 Elektr stansiyalari va zavodlarda jarayonlarni monitoring qilish

Elektr stansiyalari va sanoat zavodlarida jarayonlarni monitoring qilish harorat, bosim, oqim sarfi, tebranish va sath kabi muhim o'zgaruvchilarni uzluksiz kuzatib borish uchun keng ko'lamli asbobsozlikka tayanadi. Operatsiyalar xavfsiz va optimal diapazonlarda qolishini ta'minlash uchun ushbu o'lchovlar boshqaruv tizimlariga (DCS/SCADA kabi) uzatiladi. Masalan, issiqlik elektr stansiyasida datchiklar qizib ketish va portlashlarning oldini olish uchun qozon harorati va bosimini o'lchaydi, oqim sarfi o'lchagichlari esa samaradorlikni oshirish uchun ozuqa suvi va yoqilg'i sarfini tartibga soladi. Turbinalardagi tebranish datchiklari anomalionalarni erta aniqlab, mexanik nosozliklar va rejadan tashqari to'xtab qolishlarning oldini olishga yordam beradi. Ishlab chiqarish muhitida asbobsozlik xuddi shunday mahsulot sifati va energiya samaradorligini saqlash uchun real vaqt rejimida ma'lumotlarni taqdim etadi. Yig'ish yoki jarayon liniyasi bo'ylab o'rnatilgan datchiklar boshqaruv tizimlari aktuatorlarni sozlashlari hamda jarayonni spetsifikatsiya doirasida ushlab turishlari uchun sharoitlarni (harorat, bosim, aylantiruvchi moment va boshqalar) monitoring qiladi. Jarayonlarning to'g'ri asbobsozligi samaradorlikni (kirish materiallarini optimallashtirish va chiqindilarni kamaytirish orqali), mahsulot izchilligini (jarayon o'zgaruvchilarini mo'ljallangan holatda ushlab turish orqali) va xavfsizlikni (agar parametrlar xavfli hududga o'tib ketsa, signallarni yoki to'xtashlarni ishga tushirish orqali) oshiradi.



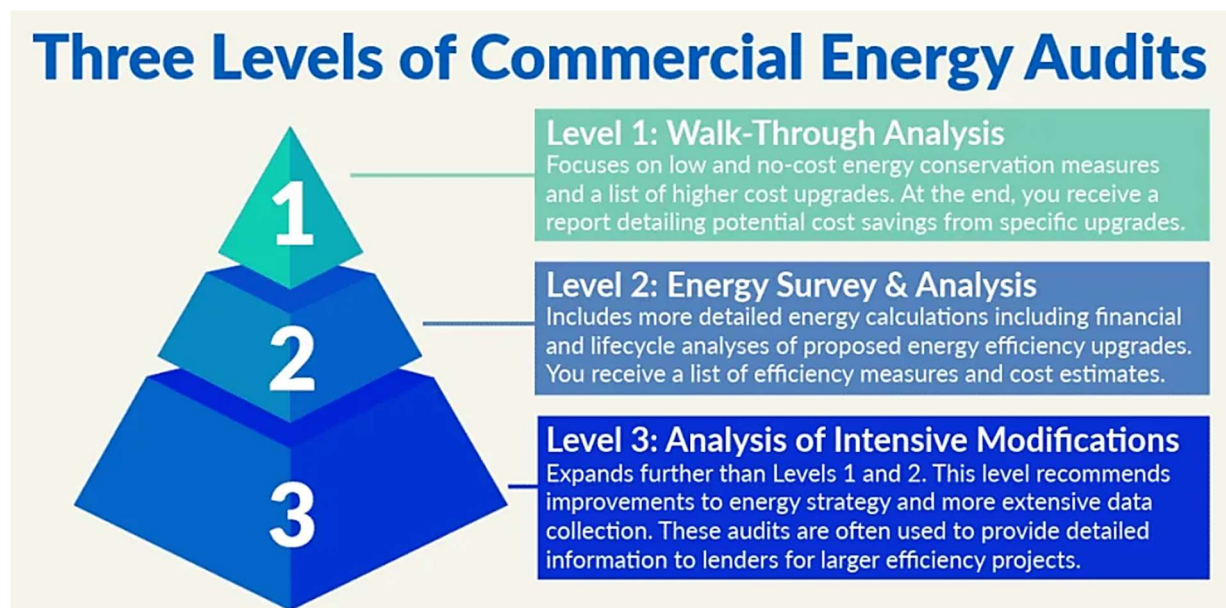
Rasm 57: Jarayonni monitoring qilishga misol

Umuman olganda, zamonaviy sanoat operatsiyalari barqaror va samarali ishlab chiqarishga erishish uchun birlashtirilgan datchiklar tarmoqlariga hamda avtomatlashtirilgan monitoringga tayanadi.

13.2 Energiya auditi va ishlash ko'rsatkichlari (Performance Metrics)

Energiya auditi — ma'lumotlarni yig'ish va samaradorlikni oshirish imkoniyatlarini aniqlash maqsadida asbobsozlikdan foydalangan holda obyektidagi energiyadan qanday foydalanilayotganini tizimli tekshirishdir. Amaliyotda sanoat energiya auditi uskunalari va jarayonlar bo'ylab elektr energiyasi, yoqilg'i va boshqa kommunal xizmatlar iste'molini o'lchash uchun quvvat o'lchagichlari, ma'lumotlarni qayd qiluvchi qurilmalar va datchiklarni o'rnatishni o'z ichiga oladi. Auditorlar asosiy bazalarni o'rnatish va energiya ishlash ko'rsatkichlarini sanoat standartlariga nisbatan baholash uchun ushbu ma'lumotlarni tahlil qiladilar. Asosiy ko'rsatkichlar (ko'pincha Energiya unumdorligi ko'rsatkichlari, EnPIs deb ataladi) umumiy energiya iste'moli (masalan, kWh), energiya sig'imi (mahsulot birligiga yoki ishlagan soatiga sarflangan energiya) va ehtimol ishlab chiqarish hajmi bo'yicha energiya narxi yoki uglerod emissiyasini o'z ichiga oladi. Ushbu ko'rsatkichlarni monitoring qilish orqali kompaniyalar o'zlarining natijalari ilg'or tajribalar bilan qanday taqqoslanishini o'lchashlari va vaqt o'tishi bilan yaxshilanishlarni kuzatishlari mumkin. Audit davomida kutilganidan yuqoriroq energiya

ko'rsatkichlari orqali samarasiz tizimlar (katta o'lchamli motorlar, oqayotgan kompressorlar, izolyatsiya qilinmagan uskunalar va boshqalar) aniqlanadi. Natijada kutilayotgan tejamkorlik bilan birga tavsiya etilgan Energiya samaradorligi chora-tadbirlari (takomillashtirilgan uskunalar, jarayonni optimallashtirish, chiqindi issiqlikni qayta tiklash va h.k.) ro'yxati olinadi. Eng muhimi, asbobsozlikdan doimiy foydalanish energiyani boshqarishning bir qismidir, yaxshilanishlar amalga oshirilgandan so'ng, ko'pincha tejamkorlikni tekshirish va ushlab turish uchun energiyadan foydalanishni uzluksiz kuzatib borish maqsadida doimiy qo'shimcha hisoblagichlar (sub-meters) va monitoring tizimlari o'rnatiladi.



Rasm 58: Energiya auditining darajalari

Xulosa qilib aytganda, energiya auditlari energiyadan foydalanishni kamaytirish va umumiy samaradorlikni oshirish bo'yicha ma'lumotlarga asoslangan qarorlar qabul qilishga turtki berish uchun o'lchov vositalari hamda aniq belgilangan ishlash ko'rsatkichlaridan foydalanadi.

13.3 Amaliy misollar (Case Studies)

Haqiqiy hayotdagi amaliy misollar (case studies) ilg'or asbobsozlikning sanoat samaradorligiga ta'sirini ko'rsatadi. Masalan, KROHNE kompaniyasi Yevropa metrologiya loyihasida real ish sharoitida tasdiqlangan elektr stansiyalari ilovalari uchun ultratovushli oqim sarfi o'lchagichini ishlab chiqdi. Yirik kommunal xizmat ko'rsatuvchi kompaniya (E.ON) Shvetsiyadagi yadroviy stansiyada ushbu yuqori aniqlikdagi oqim sarfi o'lchagichini o'rnatganda, o'lchovning yanada qat'iy pretsizionligi samaradorlikning sezilarli darajada oshishiga olib keldi, ya'ni minglab uylarni quvvatlantirish uchun yetarli bo'lgan o'rtacha 60 MVt ekvivalentga teng

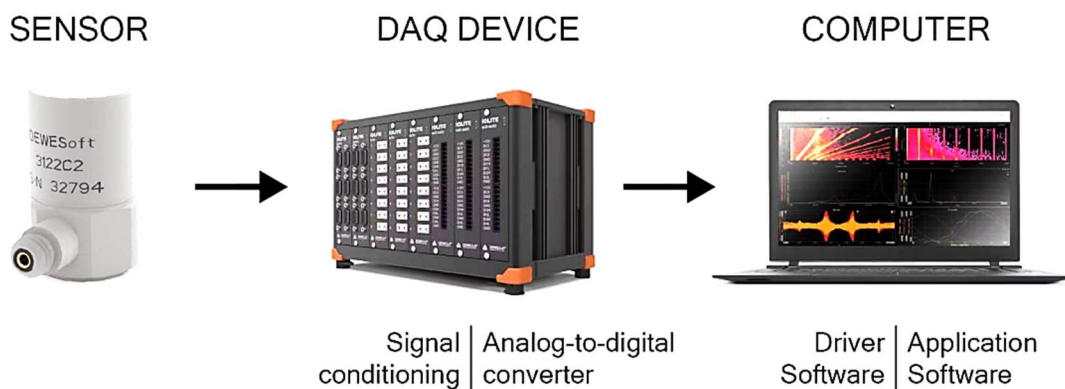
ishlab chiqarishning o'sishini ta'minladi. Ushbu misol yaxshiroq asbobsozlik (bu holatda bug' yoki ozuqa suvining oqim sarfini aniqroq monitoring qilish) energiya ishlab chiqarishni qanday qilib bevosita oshirishi va yo'qotishlarni kamaytirishi mumkinligini ta'kidlaydi. Boshqa amaliy misollar asbobsozlik ishonchlilik va ishlash vaqtini yaxshilashini ko'rsatadi. Bitta sanoat obyektida aylanuvchi mexanizmlarga real vaqt rejimida tebranish monitoringini qo'shish buzilishlarni bashorat qilish va ularning oldini olishga yordam berdi, turbinalarning tez-tez o'chib qolishini bartaraf etdi hamda zavodning umumiy tayyorlik (availability) darajasini oshirdi. Kengroq aytganda, ko'plab sohalar (neft-gaz, kimyo, ishlab chiqarish) datchiklarni yoki ma'lumotlarni yig'ish tizimlarini takomillashtirish orqali o'sishga erishganini hujjatlashtirgan, jumladan, neftni qayta ishlash zavodlari yonilg'i-havo aralashmasini optimallashtirish uchun onlayn analizatorlardan foydalanishdan (yonilg'i sarfi va emissiyalarni kamaytirish), to sifat nazorati uchun mashinali ko'rish va datchiklardan foydalanadigan zavodlargacha (nuqsonlar darajasini pasaytirish). Bunday misollar zamonaviy o'lchov tizimlariga sarmoya kiritish aniq foyda keltirishini ko'rsatadi: xavfsizroq operatsiyalar, yuqoriroq samaradorlik va jarayonni optimallashtirishni harakatlantiruvchi ma'lumotlar. Ushbu amaliy misollar asbobsozlikning energiya va sanoat tizimlarida ishlash samaradorligini oshirishning asosiy omili sifatidagi rolini mustahkamlaydi.

14. Tizim dizayni va integratsiyasi

14.1 To'liq o'lchov tizimlarini loyihalash

To'liq o'lchov tizimini loyihalash datchiklar, signalni moslashtirish, ma'lumotlarni yig'ish apparati va dasturiy ta'minot integratsiyasini qamrab oluvchi yaxlit yondashuvni talab qiladi. Jarayon odatda o'lchov talablarini aniq belgilashdan boshlanadi: Qanday fizik kattaliklarni o'lchash kerak? Qanday diapazonda, qanday aniqlik va javob vaqti bilan? Atrof-muhit sharoitlari (ekstremal haroratlar, tebranish, xavfli hududlar) ham hisobga olinishi kerak, chunki ular datchikni tanlash va uning korpusiga ta'sir qiladi. Talablar belgilangandan so'ng, muhandislar har bir parametrga mos datchiklar/o'zgartirgichlarni tanlaydilar, masalan, harorat uchun termoparalar yoki RTD lar, bosim uchun bosim o'zgartirgichlar, oqim uchun oqim sarfi o'lchagichlar va hokazo, ularning har biri kerakli diapazon va aniqlikka javob berish uchun tanlanadi. Datchikning sezgirligi, ajrata olish qobiliyati va chidamliligi (masalan, yuqori haroratli yoki korroziyali muhit uchun mustahkam datchik tanlash) kabi xususiyatlariga e'tibor qaratiladi. Keyinchalik, dizayn signalni moslashtirish va interfeys zanjirlarini o'z ichiga oladi. Ko'pgina datchiklar kuchaytirishni, filtrlashni yoki uyg'otishni talab qiladigan past darajali yoki yuqori qarshilikli signallarni chiqaradi; masalan, tenzodatchik uchun Wheatstone ko'prigi va kuchaytirgich, termopara uchun esa sovuq chok kompensatsiyasiga ega past shovqinli kuchaytirgich kerak bo'lishi mumkin. Ushbu moslashtiruvchi elementlar datchik chiqishlari ma'lumotlarni yig'ish (DAQ) tizimi ularni aniq raqamlashtira oladigan shaklda bo'lishi uchun rejalashtirilgan. DAQ apparatini tanlash yana bir muhim qadamdir, tizim barcha datchiklarni boshqarish uchun yetarli kirish kanallariga (analog/raqamli), ajrata olish qobiliyatiga (ADC bit chuqurligi) va diskretlash chastotasiga ega bo'lishi kerak. Shuningdek, ishlash va miqyoslanish ehtiyojlaridan kelib chiqqan holda DAQ arxitekturasini (markazlashtirilgan yoki taqsimlangan modullar, kompyuterga asoslangan DAQ ga qarshi mikrokontroller va boshqalar) bo'yicha qaror qabul qilish kerak. Loyihalash davomida integratsiya asosiy o'rinni egallaydi: tizimning har bir qismi, datchiklar, DAQ qurilmasi, kompyuter va dasturiy ta'minot muammosiz birgalikda ishlashi kerak. Bu mos keluvchi apparatni (kuchlanish signallari diapazonlari, ulagichlar) tanlashni va datchik ma'lumotlarini o'qish, ularni ro'yxatga olish va ehtimol foydalanuvchi interfeyslari yoki boshqaruv chiqishlarini taqdim etish uchun dasturiy ta'minot/mikrodasturlarni (firmware) ishlab chiqishni o'z ichiga oladi. Loyihachilar ko'pincha kalibrlash tartib-qoidalarini (masalan, tizimga sinov portlari yoki etalon standartlarni kiritish) rejalashtiradilar va sanoat standartlariga (masalan, aniqlik bo'yicha ISA yoki IEC standartlariga javob beradigan datchiklardan foydalanish) mosligini hisobga oladilar. Va nihoyat, o'lchov

tizimining mustahkamligi va ishonchliligini ta'minlash uchun quvvat manbai, sim yotqizish sxemasi va korpus dizayni kabi omillar hal qilinadi. Xulosa qilib aytganda, o'lchov tizimini loyihalash bu tizim integratsiyasi bo'yicha mashg'ulot bo'lib, xom fizik signallarni ishlatishga yaroqli ma'lumotlarga aniq aylantirilishi uchun apparat va dasturiy ta'minotni ehtiyotkorlik bilan muvofiqlashtirishni talab qiladi.

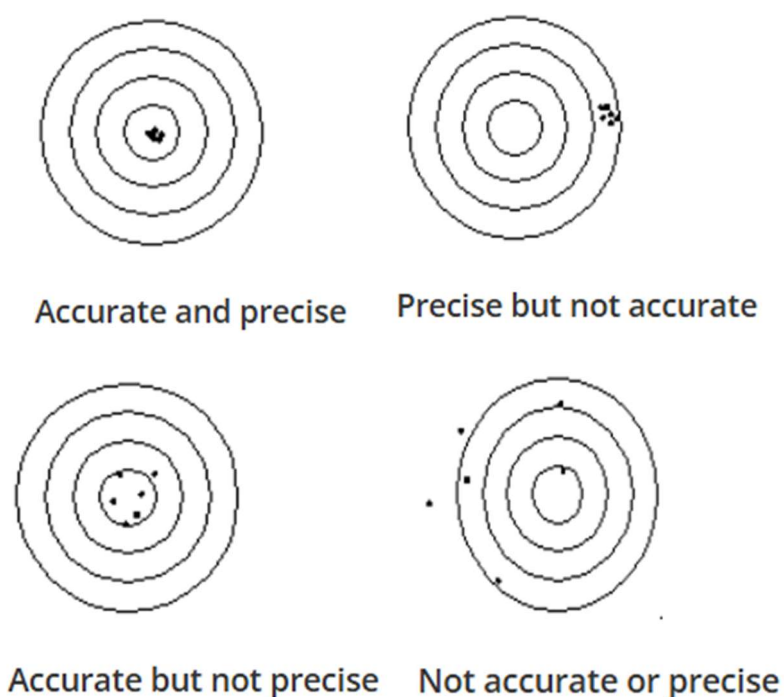


Rasm 59: DAQ tizimi sxemasi

14.2 Datchiklar integratsiyasi va DAQ konfiguratsiyasi

Datchiklarni ma'lumotlarni yig'ish tizimiga integratsiyalash sim yotqizishga, signal yaxlitligiga va DAQ apparatini sozlashga jiddiy e'tibor qaratishni o'z ichiga oladi. Har bir datchik to'g'ri kabellar va DAQ kirish kanallariga to'g'ri biriktirilgan pinlar (pin assignments) bilan, shovqinni qabul qilishni minimallashtirish uchun ekranlangan kabellar va to'g'ri yerga ulash usullaridan foydalangan holda ulanishi kerak. Aslida, analog datchik signallarini o'lchash shunchaki simlarni ulash kabi oddiy emas, datchik signalining turini (kuchlanish, tok kuchi halqasi va boshqalar) tushunish, DAQda to'g'ri kirish rejimini tanlash (masalan, bitta uchli yoki differensial) va aniq, shovqinsiz ma'lumotlarni olish uchun mos kabel sxemasidan foydalanish kerak. Agar datchik juda kichik kuchlanish (termoparaning millivolt signali kabi) yoki qarshilik o'zgarishini (RTD yoki tenzodatchik kabi) chiqarsa, u odatda oraliq signal moslashtirgichni talab qiladi. Signalni moslashtiruvchi modullar (ular tashqi yoki DAQ ga o'rnatilgan bo'lishi mumkin) past darajadagi signallarni kuchaytiradi, keraksiz shovqinlarni filtrlaydi va DAQ kanallari o'lchash mumkin bo'lgan diapazonda moslashtirilgan signallarni qabul qilishi uchun har qanday kerakli uyg'otishni (masalan, RTD lar uchun doimiy tok kuchi, tenzodatchiklar uchun ko'priknii uyg'otish) ta'minlaydi. Datchiklar birlashtirilganda, DAQ ning har bir kanali dasturiy ta'minotda to'g'ri sozlamalar bilan o'rnatiladi: kirish diapazoni

(kutilayotgan datchik chiqishi ko'lamiga mos kelishi uchun), diskretlash chastotasi (datchik dinamikasini tutib olish uchun yetarlicha tez) va kalibrlash shkalasi (xom ADC sanoqlari yoki voltlar muhandislik birliklariga aylantirilishi uchun). Agar bir nechta datchiklar ma'lumotlarini o'zaro bog'lash kerak bo'lsa, zaruriy vaqtni belgilash yoki sinxronizatsiyani sozlash ham muhimdir (masalan, tebranish va kuch o'lchovlari bir vaqtning o'zida diskretlanishini ta'minlash). Integratsiya davomida ko'pincha halqa tekshiruvlari (loop checks) amalga oshiriladi, datchikka ma'lum bir ta'sir yoki simulyator yuborilib, DAQ to'g'ri qiymatni o'qiyotgani tekshiriladi, bu esa sim yotqizish va konfiguratsiya to'g'ri ekanligini tasdiqlaydi. Bundan tashqari, yerga ulash va izolyatsiyaga e'tibor qaratiladi: ba'zi datchiklar (batareya bilan ishlaydigan yoki izolyatsiyalangan chiqishlar kabi suzuvchi signal manbalari) yer halqalarining oldini olish uchun differensial rejimda ulanishi kerak, holbuki yerga tayanadigan datchiklar bitta uchli konfiguratsiyadan foydalanishi mumkin. To'g'ri yerga ulash va ekranlash (ekranlangan kabellarning bir uchini yerga ulash, yer potensiallari farqlaridan qochish) datchik liniyalaridagi xalaqitlarni kamaytirishga yordam beradi. Xulosa qilib aytganda, datchiklar integratsiyasi datchik va DAQni elektr jihatdan bir xil tilda gapirishga majbur qilishdir va DAQ konfiguratsiyasi har bir datchikning signalini real sharoitlarda aniq ushlash uchun ma'lumotlarni yig'ish tizimini sozlashni anglatadi. To'g'ri bajarilganda, natija tahlil qilish yoki boshqarish uchun tayyor bo'lgan, datchiklarning analog signallari yuqori ishonchlik bilan raqamli ma'lumotlarga aylantiriladigan ishonchli o'lchov sozlamasiga aylanadi.



Rasm 60: O'lchov Aniqligi (Accuracy) va Izchilligi (Precision) vizualizatsiyasi

14.3 Ishlash samaradorligini baholash

O'lchov tizimi qurilgan va ishlay boshlaganidan so'ng, uning ishlashi kerakli xususiyatlar va sifat standartlariga javob berishini ta'minlash uchun baholanishi kerak. Aniqlik (accuracy) va izchillik (precision) ishlashni baholashning asosiy jihatlari hisoblanadi. Aniqlik kalibrlash sinovlari orqali tekshiriladi: tizimning ko'rsatkichlarini o'lchov diapazoni bo'ylab ma'lum etalon standartlar yoki kalibrlash asboblari bilan solishtirish. Bu ko'rsatkichlardagi har qanday noxolislikni (tizimli xato) ochib beradi va chiziqlilikni (o'lchov xatosi past, o'rta, yuqori qiymatlarda izchil qolish-qolmasligini) tekshiradi. Masalan, bir qator ma'lum bosimlar yoki kuchlanishlarni kiritish va tizim chiqishini qayd etish, so'ngra kalibrlash egriliklari va og'ishlarni hisoblash mumkin. Izchillik (Precision) o'lchovlarning takrorlanuvchanligi va qayta olinuvchanligini o'rganish orqali baholanadi. Takrorlanuvchanlik (Repeatability) deganda bir xil miqdor bir xil sharoitlarda bir necha marta o'lchanganda, ko'rsatkichlar bir-biriga juda yaqin bo'lishi (past tasodifiy o'zgaruvchanlik) tushuniladi. Qayta olinuvchanlik (Reproducibility) tizimning izchilligi o'z kuchida qolishini ta'minlash uchun turli sharoitlarda (turli operatorlar, turli kunlar yoki biroz boshqacha sozlamalar) o'lchovlarning izchilligini tekshirishni o'z ichiga oladi. O'lchovdagi o'zgaruvchanlikni rasmiy tahlil qilish uchun ko'pincha Gage R&R (Asbob takrorlanuvchanligi va qayta olinuvchanligini o'rganish) kabi vositalardan foydalaniladi. Aniqlik/izchillikdan tashqari, boshqa ishlash omillari barqarorlikni (tizim vaqt o'tishi bilan kalibrlashni saqlab qoladimi yoki ko'rsatkichlar siljiydimi?), javob vaqti/chastota xarakteristikasini (tizim o'lchanadigan o'zgaruvchidagi o'zgarishlarga qanchalik tez va ishonchli javob bera oladi) hamda ajrata olish qobiliyatini (tizim aniqlay oladigan eng kichik o'zgarishni) o'z ichiga oladi. Ishlashni baholash tizimni turli xil atrof-muhit sharoitlariga ham qo'yishni o'z ichiga olishi mumkin, masalan, agar u dalada ishlatilsa, past va yuqori atrof-muhit haroratida harorat datchigining aniqligini sinab ko'rish, uning hanuz spetsifikatsiya doirasida ishlashini tekshirish. Ushbu sinovlarning barchasi tizimning o'lchov noaniqligini aniqlash uchun tahlil qilinadigan ma'lumotlarni yaratadi. Agar tizim haddan tashqari xatolik yoki beqarorlik ko'rsatsa, muhandislar ishlash ma'qul bo'lgunga qadar nosozliklarni bartaraf etadi va komponentlar yoki kalibrlashni yaxshilaydi. Faqat o'lchov noaniqligi yaxshi tushunilgan va kerakli tolerantlikka javob bergandan so'nggina qaror qabul qilish uchun tizimdan olingan ma'lumotlarga to'liq ishonish mumkin. Aslini olganda, ishlashni baholash - bu o'lchov tizimi uchun tekshirish qadami bo'lib, birlashtirilgan datchiklar to'plami va DAQ ishlab chiqarishda foydalanish uchun qo'llanilishidan oldin kerakli darajadagi aniqlik hamda izchillikdagi ishonchli ma'lumotlarni yetkazib berishini isbotlaydi.

15. Bitiruv (Capstone) loyihasi: Sanoat o'lchovini amalga oshirish

15.1 Jamoaga asoslangan dizayn va amalga oshirish

Sanoat asbobsozligidagi bitiruv loyihalari haqiqiy muhandislikning hamkorlik tabiatini aks ettirgan holda odatda jamoalar tomonidan hal qilinadi. Jamoaga asoslangan samarali dizayn va uni amalga oshirish aniq muloqotni, majburiyatlarni taqsimlashni hamda muvofiqlashtirilgan ish oqimlarini talab qiladi. Dastlab jamoa loyiha maqsadlari va hujum rejasini (plan of attack) birgalikda tushunib olishi kerak. Bu ko'pincha loyihani quyi vazifalarga bo'lishni anglatadi, masalan, bitta kichik guruh apparat ta'minotiga (datchik tanlash, zanjirlarni yig'ish), boshqasi dasturiy ta'minotga (DAQ dasturlash, ma'lumotlarni qayta ishlash algoritmlari) va boshqalar ushbu qismlarning keyinchalik birlashishini ta'minlagan holda sinovdan o'tkazish yoki hujjatlashtirishga e'tibor qaratishi mumkin. Rollar va mas'uliyatlarni belgilash (ba'zida RACI matritsasi yoki mas'uliyatlar jadvali kabi vositalar yordamida) har bir a'zoga bo'shliqlar yoki bir-birining ustiga chiqishlarga (overlaps) yo'l qo'ymasdan o'z e'tibor markazini bilishiga yordam beradi. Jamoa taraqqiyotni kuzatish uchun loyihalarni boshqarish usullaridan foydalangan holda bosqichlar (milestones) bilan loyiha vaqt jadvalini (timeline) tuzadi.

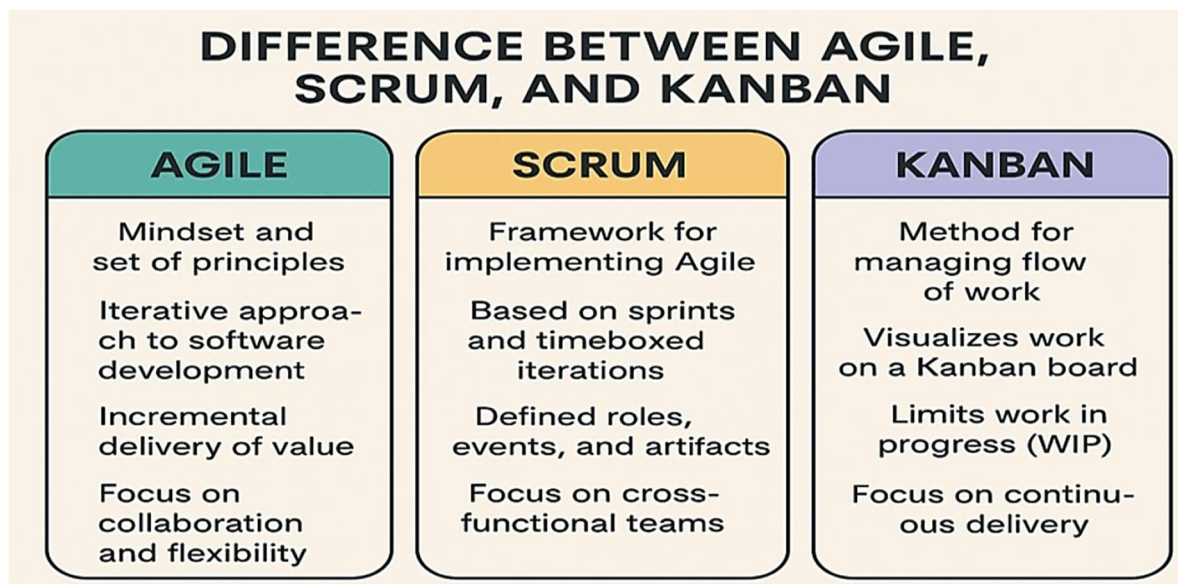
RACI Chart			
Task/Role	Role 1	Role 2	Role 3
Task 1	R	R	I
Task 2	A	C	C
Task 3	A	I	I

Definitions
R = Responsible
A = Accountable
C = Consulted
I = Informed

Rasm 61: RACI jadvali misoli

Gantt jadvallari yoki Agile doskalari (Scrum/Kanban) vazifalarni rejalashtirish, egalarini tayinlash va muddatlarni kuzatish uchun keng tarqalgan. Loyiha davomida

muntazam aloqa muhim ahamiyatga ega: jamoalar sa'y-harakatlarni sinxronlashtirish, muammolarni hal qilish va birgalikda dizayn qarorlarini qabul qilish uchun tez-tez uchrashuvlar yoki qisqa tekshiruvlar (check-ins) o'tkazadilar. Zamonaviy hamkorlik vositalari buni sezilarli darajada osonlashtiradi, jamoalar aloqada bo'lish uchun guruh xabarlar va video uchrashuvlardan (masalan, Slack yoki Zoom) hamda ma'lumotlar, kodlarni real vaqtda baham ko'rish uchun bulutli platformalardan (Google Drive, GitHub va boshqalar) foydalanishi mumkin. Bunday texnologiyadan foydalanish orqali barcha a'zolar eng so'nggi chizmalarga, dasturiy ta'minot versiyalariga va sinov ma'lumotlariga kirishlari mumkin, bu esa tushunmovchiliklarni kamaytiradi. Yana bir asosiy jihat - dizaynning yaxlit (integrated) sharhlari: turli bosqichlarda jamoa datchik interfeysini DAQ bilan ko'rib chiqish yoki butun tizimni simulyatsiya qilish uchun yig'ilishi kerak, shunda apparat-dasturiy integratsiya muammolari erta ushlanadi. Ushbu takroriy integratsiya har bir qism (mexanik moslama, datchik zanjiri, kod moduli va boshqalar) birlashtirilganda ularning mo'ljallanganidek ishlashini ta'minlaydi. Jamoada ishlash, shuningdek, har bir a'zoning kuchli tomonlaridan foydalanishni ham anglatadi (masalan, kodlash ko'nikmalari kuchli bo'lgan kishi LabVIEW dasturini ishlab chiqishga rahbarlik qilishi mumkin, asbobsozlik tajribasiga ega boshqasi esa kalibrlash rejalarini hal qilishi mumkin).



Rasm 62: Agile & Scrum & Kanban

Biroq, bilim almashish va kerak bo'lganda istalgan a'zo o'rnini to'ldirishi uchun o'zaro o'qitish (cross-training) rag'batlantiriladi. Va nihoyat, jamoaviy loyihalar yumshoq ko'nikmalarni (soft skills) shakllantirishga yordam beradi: a'zolar texnik aloqa, ziddiyatlarni hal qilish va birgalikda muammolarni hal qilish bo'yicha

professional muhandislik sharoitlari uchun bebaho tajribalarni mashq qiladilar. Yaxshi muvofiqlashtirilgan jamoa oxir-oqibat o'lchov tizimini istalgan shaxsning o'zidan ko'ra mustahkamroq loyihalashtiradi va amalga oshiradi, chunki hamkorlik jarayoni xatolarni ushlab olishga va yo'l davomida ijodiy yechimlarni ishlab chiqishga moyil bo'ladi.

Gantt Chart

Task Name	Q1 2019			Q2 2019		Q3 2019
	Jan 19	Feb 19	Mar 19	Apr 19	Jun 19	Jul 19
Planning						
Research						
Design						
Implementation						
Follow up						

Rasm 63: Gantt jadvali namunasi

15.2 Sinovdan o'tkazish va tasdiqlash (Validation)

Bitiruv loyihasini amalga oshirish bosqichida dizayn barcha funksional talablar va ishlash mezonlariga javob berishini tasdiqlash uchun o'lchov tizimi har tomonlama sinovdan o'tkaziladi va tasdiqlanadi. Sinov jarayoni komponentlar darajasidan boshlanadi va yuqoriga qarab ishlaydi. Alohida elementlar uchun birlik (Unit) sinovi o'tkaziladi: masalan, har bir datchik DAQ o'qiy oladigan to'g'ri chiqish signalini yaratishini tasdiqlash uchun (ehtimol harorat datchigini ma'lum harorat manbai ta'sirida qoldirish yoki bosim o'zgartirgich uchun kuchlanish simulyatoridan foydalanish orqali) sinovdan o'tkaziladi. Xuddi shunday, har qanday maxsus zanjir yoki dasturiy modul kutilganidek ishlashini ta'minlash uchun simulyatsiya qilingan kiritishlar (inputs) bilan sinovdan o'tkaziladi. Shundan so'ng, integratsiya sinovi (yoki "halqani tekshirish") amalga oshiriladi, bu datchikdan DAQ orqali dasturiy ta'minotgacha bo'lgan signal yo'lini tekshirishni o'z ichiga oladi. Amaliyotda ma'lum bir kirish yoki shart qo'llaniladi va tizimning boshidan oxirigacha o'qishi

tekshiriladi. Masalan, jamoa kalibrlash signalini kiritishi (datchik o'rnida aniq 100 mV manba kabi) va dasturiy ta'minot tegishli muhandislik qiymatini to'g'ri ko'rsatishini ko'rishi mumkin, shu bilan bir vaqtda simlar, DAQ konfiguratsiyasi va kodni tasdiqlaydi. Agar tizim boshqaruv yoki monitoring platformalari (masalan, SCADA tizimiga ma'lumotlarni yuborish yoki signalni ishga tushirish) bilan bog'langan bo'lsa, bu aloqa havolalari ham sinovdan o'tkaziladi. Sozlama funksional jihatdan tasdiqlangandan so'ng, rasmiy kalibrlash va tasdiqlash sinovi amalga oshiriladi. Bu avval muhokama qilingan ishlash samaradorligini baholashni takrorlaydi. Jamoa tizimning o'z diapazoni bo'ylab aniqligini tekshirish, kerak bo'lganda og'ishlar (offsets) yoki nishabliklarni (slopes) kalibrlash va takrorlanuvchanlikni ta'minlash uchun etalon asboblari yoki standart sinov tartib-qoidalaridan foydalanadi. Ular kalibrlash natijalarini hujjatlashtiradilar va kalibrlash egriliklari yoki tuzatish omillarini yaratishlari mumkin. Tasdiqlash, shuningdek, tizimni real ishlash sharoitlarida sinab ko'rishni anglatadi. Agar o'lchov tizimi sanoat muhiti uchun mo'ljallangan bo'lsa, jamoa dalaga taqlid qiluvchi laboratoriya sharoitida sinov amaliyotini o'tkazishi mumkin (masalan, tajriba (pilot) qurilmasidagi jarayon o'zgaruvchisini o'lchash). Ular vaqt o'tishi bilan tizimning barqarorligini va uning dinamik o'zgarishlarga javobini kuzatadilar. Sinov paytida har qanday nosozlik yoki kutilmagan xatti-harakatlar dizaynga qaytariladi, ehtimol xalaqit tufayli datchikning o'rnini o'zgartirish kerakdir yoki tez o'zgarishlarni yozib olish uchun diskretlash chastotasini oshirish kerak bo'lar. Jamoa ushbu muammolarni hal qiladi va tizim doimiy ishlamaguncha takrorlaydi. Va nihoyat, sinov natijalarini hujjatlashtirish tasdiqlashning muhim qismidir. Jamoa sinov jarayonlari, natijalar va kuzatilgan har qanday og'ishlarni tuzib chiqadi, bunda har bir talab (aniqlik, javob vaqti, ma'lumotlarni qayd qilish qobiliyati va h.k.) qondirilganligini yoki har qanday cheklovlarni qayd etganligini tasdiqlovchi dalillar keltiradi. Ushbu qat'iy sinov va tasdiqlash jarayoni sanoat o'lchov tizimi o'rnatilganda ishonchli ishlashiga ishonch beradi va u ko'pincha foydalanuvchini o'qitish va texnik xizmat ko'rsatish tartib-qoidalari uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

15.3 Yakuniy hisobot va taqdimot

Bitiruv loyihasi jamoaning butun loyihani dizayndan tortib to sinovgacha sarhisob qiluvchi keng qamrovli texnik hisobot va taqdimotni yetkazib berishi bilan yakunlanadi. Yakuniy hisobot rasmiy hujjat bo'lib, unda jamoa loyiha foni, dizayn metodologiyasi, amalga oshirilishi va natijalari haqida batafsil ma'lumot beradi. Odatda, u muammo va maqsadlarni ko'rsatuvchi kirish qismini, tanlangan o'lchash yechimini tushuntiruvchi dizayn bo'limini (chizmalar, diagrammalar va asosiy qarorlar uchun mantiqiy asoslar bilan) va tizimning qanday qurilganligini

tavsiflovchi amalga oshirish bo'limini o'z ichiga oladi. Eng muhimi, hisobotda sinov va tasdiqlash xulosalari taqdim etiladi, masalan, kalibrlash ma'lumotlari, erishilgan ishlash ko'rsatkichlari va ularning dastlabki talablar bilan qanday solishtirilishi. Loyiha davomida duch kelingan har qanday muammolar va ularning qanday hal qilingani, shuningdek, qolgan cheklovlar yoki kelajakda yaxshilash bo'yicha tavsiyalar hujjatlashtirilishi kerak. Hisobot aniq, professional tilda yozilishi kerak, chunki u talabalarning muhandislik va muloqot qobiliyatlaridan dalolat beradi. Odatda jamoaning barcha a'zolari texnik aniqlik va izchillikni ta'minlash uchun uni yozishga va ko'rib chiqishga hissa qo'shadilar. Ma'lumotlar ko'pincha xulosalarni qo'llab-quvvatlash uchun jadvallar yoki grafiklar (to'g'ri belgilar va birliklar bilan) ko'rinishida taqdim etiladi hamda foydalanilgan har qanday tashqi ma'lumotlar yoki standartlar uchun manbalar (references) keltiriladi. Bunga parallel ravishda jamoa o'z ishini o'qituvchilarga, tengdoshlariga va ehtimol soha homiylariga ko'rsatish uchun yakuniy taqdimot tayyorlaydi. Ishlayotgan tizimning jonli namoyishini o'z ichiga olishi mumkin bo'lgan ushbu og'zaki taqdimotda jamoa loyihani o'zining asosiy nuqtalariga ajratadi: motivatsiya (nima uchun o'lchov muammosi muhim), yechim konsepsiyasi, dizaynni/amalga oshirish jarayonini yoritish, va erishilgan natijalar (masalan, tizim o'z aniqligi maqsadlariga erishganligini namoyish etish yoki qurilmadan jonli ma'lumotlar oqimini ko'rsatish). Slaydlar kabi vizual vositalar tizim arxitekturasini va sinov natijalarini qulay usulda tasvirlash uchun ishlatiladi. Vaqt cheklanganligi sababli, taqdimot har bir texnik tafsilotdan ko'ra yuqori darajadagi topilmalar va ta'sirli natijalarga e'tibor qaratadi. Auditoriyani jalb qilish uchun hikoya qilish usullaridan foydalanish mumkin, masalan, dastlabki qiyinchilik va jamoa uni qanday yenggani tasvirlanadi. Xuddi shunday muhim narsa, jamoa o'z tushunchasining chuqurligini ko'rsatib, savollarga javob berishga tayyor bo'lishi kerak. Umuman olganda, kuchli muloqot juda muhimdir: texnik topilmalarni yozma hisobotlar va og'zaki taqdimotlar orqali samarali yetkazish qobiliyati bitiruv loyihasi uchun asosiy ta'lim natijasidir. Nimalarga erishilgani to'g'risida aniq hisobot berish va uni ma'lumotlar bilan qo'llab-quvvatlash orqali jamoa nafaqat akademik talablarni to'ldiradi, balki manfaatdor tomonlarga (masalan, kompaniya homiysi yoki loyihani yaratishi mumkin bo'lgan keyingi talabalar jamoasi) qimmatli yozuvni ham taqdim etadi. Ushbu yakuniy qadam loyihani ishlab chiqishdan real dunyoda foydalanishga o'tkazadi va hujjatlar ishni bevosita jamoadan tashqarida ham tushunishga va undan foydalanishga ishonch hosil qiladi.

Xulosa

Ushbu keng qamrovli kurs davomida biz sanoat o'lchov tizimlarining fundamental va ilg'or jihatlarini o'rgandik. Biz barcha keyingi mavzular uchun zamin yaratadigan asosiy metrologiya konsepsiyalari va atamalarini o'rganib, sanoatda aniq o'lchash rolini tushunishdan boshladik. Dastlabki daqiqalardan oq izchillik (precision) va aniqlikni (accuracy) farqlash, xatolarni tahlil qilish hamda ishonchli ma'lumotlarni ta'minlash uchun kalibrlashning muhimligini tan olgan holda o'lchov aniqligiga, izchilligiga va noaniqligiga e'tibor qaratildi. Ushbu asoslarga tayangan holda, biz turli xil fizik parametrlar uchun turli o'lchash usullarini ko'rib chiqdik. Bunga haroratni o'lchash usullari (termoparalar, RTD lar, termistorlar va hatto kontaktsiz datchiklar kabi) hamda ularni kalibrlash amaliyoti, tegishli signalni moslashtirish va kalibrlash bilan bosimni o'lchash asboblari (manometrlar, pezoelektrik va tenzodatchiklar hamda elektron bosim o'zgartirgichlar) va quvur tizimlarida qo'llaniladigan va amaliy stsenariylarda sinovdan o'tkazilgan oqim sarfini o'lchash usullari (differensial bosim va turbinali oqim sarfi o'lchagichlardan ultratovush va girdobli oqim sarfi o'lchagichlargacha) kiradi. Ushbu modullarning har biri asboblarni diqqat bilan tanlash, to'g'ri foydalanish va xatolarni boshqarish ishonchli o'qishlar uchun qanchalik muhimligini kuchaytirdi.

Kurs davomida biz o'lchashning elektr va kimyoviy sohalariga hamda zarur yordamchi texnologiyalarga kirdik. Biz multimetr va ossillograf kabi asboblarni yordamida kuchlanish, tok kuchi, qarshilik va quvvatni qanday xavfsiz o'lchashni o'rganib, zanjirlarni tekshirishda elektr xavfsizligi tartib-qoidalarining muhimligini tushunib, elektr signallarini o'lchashni qamrab oldik. Shuningdek, biz ularning sanoat jarayonlari va atrof-muhit monitoringida qo'llanilishini ta'kidlagan holda kimyoviy va atrof-muhit datchiklarini, masalan, gaz konsentratsiyasini aniqlash, pH darajasini o'lchash yoki suv o'tkazuvchanligini o'lchash qurilmalarini o'rgandik. Ushbu turli xil miqdorlarni o'lchash bilan bir qatorda biz signalni moslashtirish va analog interfeyslar haqida bilib oldik: sifatni yaxshilash uchun ko'prik zanjirlari va boshqa analog usullar yordamida xom datchik signallarini qanday filtrlash, kuchaytirish yoki o'zgartirish mumkinligi. Signalning yaxlitligi va shovqin masalalari hal qilinib, to'g'ri dizayn va ekranlash o'lchov aniqligini qanday saqlashi ta'kidlandi. Keyin biz analog signallarning ADClar orqali qanday diskretlanishi va raqamlashtirilishini, tahlil qilish uchun ma'lumotlarni real vaqt rejimida qanday yig'ish mumkinligini tushunib, ma'lumotlarni yig'ish tizimlari (DAQ) sohasiga o'tdik. NI LabVIEW kabi platformalar va ma'lumotlarni ro'yxatga olishning boshqa vositalari bilan tanishish o'lchov ma'lumotlarini olish va vizualizatsiya qilishning amaliy bajarilishini ko'rsatdi. Eng muhimi, asboblarni aniqligini tekshirish hamda o'lchovlar sanoat bo'ylab kuzatilishi va standartlashtirilishini ta'minlash uchun

asboblarni kalibrlashning standart tartib-qoidalarini, hujjatlarni yuritishni hamda ISO, ISA va NIST kabi tashkilotlarning xalqaro standartlariga rioya qilishni o'rganib, kalibrlash usullari va standartlarini ham muhokama qildik.

Kursning keyingi qismida e'tibor zamonaviy va integratsiyalashgan o'lchov tizimlariga, shuningdek, kengroq ilovalarga qaratildi. Biz an'anaviy analog datchiklar qanday qilib raqamli datchiklar va mikrokontrollerlarga asoslangan tizimlar bilan to'ldirilishi yoki o'zgartirilishini ko'rib, raqamli asbobsozlik hamda ma'lumotlarni yozib olishni o'rgandik. Bunga o'lchov asboblari uzoqdan monitoring qilish va ma'lumotlarni saqlash uchun SCADA kabi kattaroq tizimlar hamda hatto bulutga asoslangan ro'yxatga olish platformalari bilan qanday integratsiyalashuvini o'rganish kirdi. Shuningdek, biz masofaviy yoki xavfli bo'lgan muhitlarda o'lchovlarni o'tkazish hamda uzatish imkonini beruvchi simsiz datchiklar tarmoqlari (WSN) hamda RF modullari, ZigBee va LoRa kabi aloqa protokollarini ko'rib chiqib, simsiz va masofaviy o'lchov tizimlarini o'rgandik. Bu zamonaviy asbobsozlikda ulanish va moslashuvchanlikning ortib borayotgan ahamiyatini ta'kidladi. Keyin biz energiya va sanoat tizimlaridagi asbobsozlikka e'tibor qaratish orqali bu usullarning barchasini real stsenariylarda kontekstuallashtirdik. Amaliy misollar va namunalar orqali biz elektr stansiyalari, ishlab chiqarish zavodlari va energiyani boshqarish tizimlari jarayon monitoringi, samaradorlikni oshirish va xavfsizlik uchun qanday qilib to'g'ri datchiklar hamda o'lchovlarga tayanishini ko'rdik, masalan, o'lchovlar energiya auditi va ishlash ko'rsatkichlari uchun qanchalik markaziy o'rin tutadi. Shundan so'ng, biz bir nechta datchiklar, DAQ apparati va dasturiy ta'minotni birlashtirilgan, funksional tizimga qanday yig'ishni o'rganib chiqib, o'lchov tizimlari uchun tizimni loyihalash hamda integratsiyalash tamoyillarini muhokama qildik. Biz to'liq o'lchov tizimini noldan qanday loyihalash, turli xil datchiklarni tegishli signal moslashtirish bilan qanday integratsiya qilish, ma'lumotlarni yig'ish va qayta ishlashni qanday sozlash, kerakli xususiyatlarga mos kelishi uchun umumiy tizim ishini qanday baholash masalalarini hal qildik.

Kurs ushbu elementlarning barchasini amaliy tatbiqda birlashtirgan bitiruv loyihasi bilan yakunlandi. Ushbu yakuniy loyihada jamoalar o'z bilimlarini sanoat o'lchov tizimini loyihalash, qurish va sinab ko'rish uchun qo'lladilar va shu bilan nazariyani amaliyotga tatbiq etishning qiyinchiliklari hamda mukofotlarini bevosita his qildilar. Ushbu loyiha talabalardan kursda ko'rilgan barcha narsalardan foydalanishni, muayyan o'lchov vazifalari uchun mos datchiklarni tanlashni, bu datchiklarning to'g'ri kalibrlanganligini hamda ularning signallari moslashtirilganligini ta'minlashni, ma'lumotlarni yig'ish va yozib olish yechimlarini o'rnatishni, va barcha komponentlarni ishonchli tizimga birlashtirishni talab qildi. Sinov va tasdiqlash orqali talabalar real muammolarni bartaraf etishni, o'lchov

ma'lumotlarini sharhlashni va optimal ishlash uchun o'z tizimini takomillashtirishni o'rgandilar. Yakuniy hisobotni yozish va natijalarni taqdim etish har bir jamoaga dizayn borasidagi tanlovlari haqida fikr yuritish va tushunish chuqurligini ko'rsatish imkonini berdi.

Xulosa qilib aytganda, ushbu kurs sizni ushbu sohada muvaffaqiyatga erishish uchun zarur bo'lgan nazariy bilimlar va amaliy ko'nikmalar bilan jihozlagan holda o'lchash va asbobsozlik sohasi bo'ylab to'liq sayohatni taqdim etdi. Biz o'lchovlar qanday ulanishi hamda baholanishining eng asosiy konsepsiyalaridan tortib, zamonaviy raqamli va tarmoqli muhitlarda ma'lumotlarni yig'ish va boshqarishning murakkab usullarigacha bo'lgan barcha narsalarni qamrab oldik. Aniqlik va noaniqlikni tahlil qilish, harorat/bosim/oqim sarfini datchiklash, signalni moslashtirish, ma'lumotlarni yig'ish, kalibrlash standartlari va integratsiyalashgan tizim dizayni kabi mavzularni o'zlashtirib, siz endi ko'plab sanoat ilovalari uchun ishonchli o'lchov tizimlarini ishlab chiqish hamda qo'llab-quvvatlashga tayyorsiz. Butun jarayon davomida o'lchovlarda aniqlik, ishonchlilik va yaxlitlik muhimligi yotadi - bular har qanday texnik sohada sifat nazorati, xavfsizlik, samaradorlik va innovatsiyalar uchun juda muhim bo'lgan fazilatlaridir. Ushbu asos bilan siz kelajakdagi loyihalaringiz yoki karyerangizdagi o'lchov muammolariga yondashishda o'zingizga ishonch hosil qilishingiz kerak. O'lchash texnologiyalari va sanoat ehtiyojlari rivojlanishda davom etar ekan, bu yerda o'rganilgan vositalar hamda tamoyillar nafaqat bevosita asbobsozlik bilan bog'liq muammolarni hal qilishda yordam beradi, balki uzluksiz o'rganish uchun mustahkam poydevor bo'lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*, 3rd ed. Academic Press, 2020.
- [2] E. O. Doebelin and D. N. Manik, *Measurement Systems: Application and Design*, 7th ed. McGraw-Hill Education, 2019.
- [3] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 5th ed. Pearson, 2021.
- [4] J. G. Webster and H. Eren (eds.), *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, 2nd ed. CRC Press, 2014.
- [5] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 5th ed. Springer, 2016.
- [6] A. A. Kumar Somappa, K. Øvsthus, and L. M. Kristensen, “An industrial perspective on wireless sensor networks—a survey of requirements, protocols, and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1391-1412, 2014.
- [7] R. Dutta, V. S. Patel, S. Chakrabarti, A. Sharma, R. K. Das, and S. Mondal, “Parameter estimation of distribution lines using SCADA measurements,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, 2021.
- [8] A. R. Pazikadin, D. Rifai, K. Ali, M. Z. Malik, A. N. Abdalla, and M. A. Faraj, “Solar irradiance measurement instrumentation and power solar generation forecasting based on artificial neural networks (ANN): A review of five years research trend,” *Science of the Total Environment*, vol. 715, Article 136848, 2020.
- [9] A. Manukovsky, A. Sagyndyk, A. Kislov, O. Talipov, and A. Manukovsky, “Wireless data acquisition system with feedback function,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, Article 5553, 2024.
- [10] R. B. Northrop, *Introduction to Instrumentation and Measurements*, 3rd ed. CRC Press, 2014.
- [11] R. Pallás-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 3rd ed. Wiley, 2012.
- [12] P. H. Sydenham and R. Thorn (eds.), *Handbook of Measuring System Design*. Wiley, 2005
- [13] B. G. Lipták and K. Venczel (eds.), *Instrument and Automation Engineers’ Handbook: Process Measurement and Analysis*, 5th ed. CRC Press, 2016.
- [14] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2015.

- [15] R. C. Baker, Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications. Cambridge University Press, 2015.
- [16] M. Di Paolo Emilio, Data Acquisition Systems: From Fundamentals to Applied Design. Springer, 2013.
- [17] C. W. de Silva, Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation. CRC Press, 2015.
- [18] F.-G. Bănică, Chemical Sensors and Biosensors: Fundamentals and Applications. Wiley, 2012.
- [19] H. Karl and A. Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, 2005.
- [20] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). JCGM, 2008.

MUNDARIJA

1. O'lchash tizimlariga kirish.....	4
1.1 Sanoatda o'lchashning roli.....	4
1.2 Asosiy terminlar va metrologiya tushunchalari.....	5
1.3 Asosiy kattaliklar uchun o'lchash asboblari bo'yicha umumiy ma'lumotlar	8
2. Measurement Accuracy and Uncertainty	17
2.1 Izchillik, aniqlik, ajrata olish qobiliyati, takrorlanuvchanlik	17
2.2 Xatolik turlari va noaniqlik tahlili	21
2.3 Asboblarni kalibrlash asoslari	25
3. Haroratni o'lchash texnikalari.....	29
3.1 Termoparalar, RTDlar va termistorlar	29
3.2 Kontaktsiz harorat datchiklari (IR termometrlar, pirometrlar, termal tasvirlash).....	35
3.3 Haroratni kalibrlash va xatolik manbalari	38
4. Bosimni o'lchash asboblari.....	46
4.1 Manometrlar, pyezoelektrik datchiklar va tenzodatchikli bosim datchiklari.....	46
4.2 Bosim o'zgartirgichlari va signalni moslashtirish	51
4.3 Bosim datchiklarini kalibrlash va metrologik kuzatuvchanlik	55
5. Oqim sarfini o'lchash usullari.....	60
5.1 Differensial bosim, turbinali, ultrasonik va vorteks oqim o'lchagichlar	60
5.2 Quvurlarda oqim sarfini o'lchash (Oqim profillari, Reynolds soni, datchik joylashuvi).....	67
5.3 Amaliy oqim sarfi sinovlari va ishlab chiqarish tekshiruvlari	71
6. Elektr signallarini o'lchash.....	77
6.1 Kuchlanish, Tok kuchi, Qarshilik va Quvvatni o'lchash.....	77
6.2 Multimetrlar, ossillograflar va datchiklardan foydalanish.....	79
6.3 Elektr xavfsizligi qoidalari	82
7. Kimyoviy va atrof-muhit datchiklari	84

7.1 Gaz konsentratsiyasi datchiklari, pH metrlari, o'tkazuvchanlik zondlari	84
7.2 Sanoat va atrof-muhitni monitoring qilishda qo'llanilishi	87
8. Signalni moslashtirish va analog interfeyslar.....	91
8.1 Signalni filtrlash va kuchaytirish	91
8.2 Ko'priklarni zanjirlari va analog signallarni dastlabki qayta ishlash.....	93
8.3 Signal yaxlitligi va shovqin muammolari	96
9. Ma'lumotlarni yig'ish tizimlari (DAQ)	101
9.1 Diskretlash, ADClar va ma'lumotlarni konversiya qilish.....	101
9.2 Real vaqt rejimida ma'lumotlarni yig'ish tizimlari.....	105
9.3 NI LabVIEW va ma'lumotlarni yig'ish platformalari.....	107
10. Kalibrlash usullari va standartlar	112
10.1 Kalibrlash tartiblari va hujjatlashtirish	112
10.2 ISO, ISA va NIST standartlari	115
10.3 Asbob aniqligini tekshirish.....	117
11. Raqamli asbobsozlik va ma'lumotlarni yozib olish.....	123
11.1 Raqamli datchiklar va mikrokontrollerga asoslangan yozib olishdan foydalanish.....	123
11.2 SCADA va bulutli ro'yxatga olish bilan integratsiya.....	127
11.3 Ma'lumotlarni saqlash strategiyalari	132
12. Simsiz va masofaviy o'lchov tizimlari	139
12.1 Simsiz datchiklar tarmoqlari (WSN)	139
12.2 RF, ZigBee va LoRa protokollari	144
12.3 Xavfli muhitlarda o'lchash.....	151
13. Energiya va sanoat tizimlarida asbobsozlik	160
13.1 Elektr stansiyalari va zavodlarda jarayonlarni monitoring qilish.....	160
13.2 Energiya auditi va ishlash ko'rsatkichlari (Performance Metrics).....	161
13.3 Amaliy misollar (Case Studies).....	162
14. Tizim dizayni va integratsiyasi.....	164
14.1 To'liq o'lchov tizimlarini loyihalash	164
14.2 Datchiklar integratsiyasi va DAQ konfiguratsiyasi.....	165

14.3 Ishlash samaradorligini baholash.....	167
15. Bitiruv (Capstone) loyihasi: Sanoat o'lchovini amalga oshirish.....	169
15.1 Jamoaga asoslangan dizayn va amalga oshirish	169
15.2 Sinovdan o'tkazish va tasdiqlash (Validation)	171
15.3 Yakuniy hisobot va taqdimot	172
Xulosa	174
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR	177
RASMLAR RO'YXATI.....	182

RASMLAR RO'YXATI

Rasm 1: Quyosh nurlanishini o'lchash	4
Rasm 2: Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi	7
Rasm 3: O'lchov tizimi elementlari	8
Rasm 4: Termopara	9
Rasm 5: Bosim O'lchash Apparatlari.....	10
Rasm 6: Turli xil oqim sarfi o'lchagichlar [*manba: RealPars]	12
Rasm 7: Elektr O'lchash Qurilmalari.....	13
Rasm 8: NDIR (Dispersiya bo'lmagan infraqizil) gaz sensorining tuzilishi.....	14
Rasm 9: Oddiy pH o'lchagich datchik.....	15
Rasm 10: Ehtimollik zichiligi grafigi – Aniqlik va Pretsizionlikni taqqoslash	18
Rasm 11: Aniqlikning kamligi – izchillik kam va ko'p bo'lgan holatda	20
Rasm 12: Termopara datchigi	29
Rasm 13: RTD datchigi	29
Rasm 14: Termopara sxemasi	30
Rasm 15: RTD datchikni o'lchash sxemasi (manba:REALPARS).....	31
Rasm 16: K-turdagi Termopara: Kuchlanish vs Temperatura.....	31
Rasm 17: RTD va Termoparani taqqoslash (manba:REALPARS).....	33
Rasm 18: Quyosh panelining Termal tasviri.....	37
Rasm 19: Sovuq Birikish Kompensatsiya konsepti	40
Rasm 20: Datchikni Kalibrlash and O'lchov tizimi.....	41
Rasm 21: Manometer	47
Rasm 22: Bog'lanmagan simli kuchlanish o'lchagich.....	48
Rasm 23: Oqim o'lchagichlar turlari.....	62
Rasm 24: Venturi turbkali oqim o'lchagich - Venturimeter	62
Rasm 25: Keysight osilloskopida signalni o'lchash	77
Rasm 26: Tok kuchi va Kuchlanish fazalari farqi.....	78
Rasm 27: Multimetr	80
Rasm 28: Osilloskop	81
Rasm 29: Katalitik bonchoqsimon datchiklar / Pellistorlar	85
Rasm 30: pH metr	86
Rasm 31: O'tkazuvchanlik Zondi	87
Rasm 32: CEMS sxemasi (manba: Fuji electric).....	88
Rasm 33: Signalni filtrlash va kuchaytirish	92
Rasm 34: Wheatstone ko'prigi sxemasi.....	94
Rasm 35: Wheatstone ko'prigi, differensial kuchaytirgich bilan birga	95
Rasm 36: PCB dizaynda “yerga” ulashdagi muammolar	97

Rasm 37: Kabellarni ekranlash elektrostatik shovqinlarni (EMI) kamaytiradi	98
Rasm 38: O'ralgan juftlik simlarining afzalliklari	99
Rasm 39: ADC ishlash prinsipi	102
Figure 40: ADC kvantlash xatosi	102
Rasm 41: Soddalashtirilgan MPPT algoritmi namunasi, elektr tarmoqqa ulangan PV tizimlari uchun.....	104
Rasm 42: Raqamli ma'lumotlarni to'plash tizimi.....	106
Rasm 43: LabView dasturining mavjud funksiyalari.....	108
Rasm 44: Metrologik kuzatuvchanlik piramidasi	114
Rasm 45: Asbob aniqligini tekshirish - To'liq shkala (Span) xatosi	118
Rasm 46: Asbob aniqligini tekshirish - Nol xatosi	119
Rasm 47: Asbob aniqligini tekshirish - Birlashgan Nol va To'liq shkala (Span) xatosi	119
Rasm 48: Asbob aniqligini tekshirish - Chiziqlilashtirish (Linearization) xatosi.	120
Rasm 49: To'plangan ma'lumotlarni tahlil qilish va tushunish	124
Rasm 50: Raqamli protokollar va tavsiya etilgan ilovalar.....	125
Rasm 51: SCADA namuna (manba: thingsboard.io).....	129
Rasm 52: MQTT loglash namunasi	130
Rasm 53: Turli xil WSN turlarining masofaga nisbatan quvvat sarfi.....	140
Rasm 54: Star va Mesh topologiyalari.....	142
Rasm 55: Fotovoltaik tizimni ESP32 bilan monitoring qilish sxema namunasi ..	143
Rasm 56: zonalarning tasvirlanishi (ATEX bo'yicha).....	153
Rasm 57: Jarayonni monitoring qilishga misol.....	161
Rasm 58: Energiya auditining darajalari.....	162
Rasm 59: DAQ tizimi sxemasi.....	165
Rasm 60: O'lchov Aniqligi (Accuracy) va Izchilligi (Precision) vizualizatsiyasi	166
Rasm 61: RACI jadvali misoli	169
Rasm 62: Agile & Scrum & Kanban.....	170
Rasm 63: Gantt jadvali namunasi	171

