

TRANSFORMATORLARDA QIZIB KETISH VA YUKLANISH JARAYONLARINI ONLAYN MONITORING QILISH

Ismanov Muhammadziyo Abdusamat o'g'li¹
Namangan davlat texnika universiteti, dotsenti.

Xakimov Jaxongir Shuxratjon o'g'li²
Namangan davlat texnika universiteti, magistranti.
Tel: +998939454591 e-mail: ismanovm91@gmail.com¹
khakimov1223@gmail.com²

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20390046>

ANNOTATSIYA

Maqolada kuch transformatorlarining ish jarayonida sodir bo'ladigan qizib ketish va yuklanish hodisalarini real vaqt rejimida (onlayn) kuzatib borishning zamonaviy usullari ko'rib chiqilgan. Transformator izolyatsiyasining xizmat muddatini belgilovchi asosiy omillar — yog' harorati, chulg'amlarning qaynoq nuqta harorati (HotSpot), yuklanish koeffitsienti va tashqi muhit harorati o'rtasidagi bog'liqlik tahlil qilingan. Datchiklar, mikrokontrollerlar (ESP32, STM32), simli va simsiz aloqa kanallari, SCADA tizimlari hamda bulutli xizmatlardan foydalangan holda kompleks onlayn monitoring tizimi taklif etilgan. IEC 60076-7 standartiga muvofiq matematik modellar keltirilgan va laboratoriya tajribasi natijalari bilan tasdiqlangan. Tajribada 10 kVA quvvatli sinov transformatori turli yuklanish bosqichlarida (50%, 75%, 100%, 120%) sinovdan o'tkazilib, harorat dinamikasi o'lchangan. Olingan natijalar matematik modelga mos kelishi tasdiqlandi.

Kalit so'zlar: transformator, onlayn monitoring, qizib ketish, yuklanish, HotSpot, IEC 60076-7, ESP32, SCADA, izolyatsiya xizmat muddati, IoT.

1. KIRISH

Kuch transformatorlari elektr energetika tizimining eng muhim va qimmatbaho qurilmalaridan biri hisoblanadi. Ularning ishonchli ishlashi butun energotizimning barqarorligini ta'minlaydi. Statistik ma'lumotlarga ko'ra, transformatorlar avariylarining 70% dan ortig'i izolyatsiyaning qarishi, qizib ketish va haddan tashqari yuklanish natijasida yuzaga keladi. Bitta yirik kuch transformatorining ishdan chiqishi nafaqat moliyaviy zarar (millionlab so'm), balki butun mintaqaning elektrdan ajralib qolishiga ham olib kelishi mumkin. Bunday avariylarning iqtisodiy yo'qotishlari ba'zan transformator narxidan ham bir necha barobar oshib ketadi.

O'zbekiston elektroenergetika tizimida joriy holatda 110 kV va undan yuqori kuchlanishli 1500 dan ortiq kuch transformatori ishlamoqda. Ularning aksariyati 25–30 yil oldin ishga tushirilgan bo'lib, hozirda xizmat muddatining oxirgi bosqichida. Bu transformatorlarning holatini doimiy ravishda kuzatib turish va o'z vaqtida texnik ko'rikdan o'tkazish davlat ahamiyatiga ega vazifa hisoblanadi.

An'anaviy diagnostika usullari (DGA, qarshilik o'lchash, izolyatsiya sinovlari) faqat ma'lum davriylikda o'tkaziladi va transformatorni elektr tarmog'idan ajratishni talab qiladi. Bu yondashuv tezda rivojlanayotgan nuqsonlarni aniqlashga imkon bermaydi. Shuning uchun zamonaviy energetikada

onlayn monitoring (real vaqt rejimida kuzatish) tizimlari keng joriy etilmoqda. Bu tizimlar transformatorning asosiy parametrlarini (harorat, tok, kuchlanish, yog' sathi, gazlar tarkibi, qisman razryadlar va h.k.) uzluksiz o'lchaydi, ma'lumotlarni serverga jo'natadi va sun'iy intellekt yordamida tahlil qiladi.

Maqolaning maqsadi — transformatorlardagi qizib ketish va yuklanish jarayonlarini onlayn rejimda kuzatishning ilmiy-texnik asoslarini bayon etish, tizimning matematik modelini keltirish, qurilma sxemasini ishlab chiqish va laboratoriya tajribasi orqali tasdiqlash.

Vazifalari:

- transformatorlarda issiqlik chiqarish va tarqalish jarayonlarini matematik tahlil qilish;
- monitoring tizimining tarkibiy sxemasini ishlab chiqish;
- datchiklar va aloqa kanallarini tanlash mezonlarini aniqlash;
- IEC 60076-7 standarti asosida harorat hisobi metodikasini taqdim etish;
- tajriba o'tkazish va natijalarni nazariy hisob bilan solishtirish;
- izolyatsiya xizmat muddati yo'qotilishini baholash.

2. TRANSFORMATORDA QIZIB KETISH JARAYONINING FIZIKAVIY MOHIYATI

2.1. Issiqlik yo'qotishlari

Transformatorlarda ikki turdagi yo'qotishlar mavjud bo'lib, ular issiqlikka aylanadi:

1) Salt yurish (po'lat) yo'qotishlari (P_0) — magnit o'zakda girdoboʻb toklari va gisterezisdan kelib chiqadi. Ular kuchlanishga bog'liq va yuklanishdan deyarli mustaqildir.

2) Yuklanish (mis) yo'qotishlari (P_k) — chulg'amlarning omik qarshiligida hosil bo'lib, tokning kvadratiga proporsionaldir:

$$P_k = I^2 \cdot R \cdot (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

bu yerda: I — yuklanish toki, A; R — chulg'amning omik qarshiligi, Ω ; α — qarshilikning harorat koeffitsienti (mis uchun $0,00393 \text{ K}^{-1}$); T_0 — boshlang'ich harorat, °C.

Umumiy yo'qotishlar:

$$\Delta P = P_0 + K^2 \cdot P_k \quad (2)$$

bu yerda $K = I / I_{nom}$ — yuklanish koeffitsienti.

2.2. Yog' va chulg'am haroratining shakllanishi

Hosil bo'lgan issiqlik avval chulg'amlardan yog'ga, so'ngra yog'dan radiatorlar orqali atrof-muhitga uzatiladi. Transformatorning issiqlik balansi quyidagicha yoziladi:

$$C \cdot (dT/dt) = \Delta P - k_t \cdot (T - T_a) \quad (3)$$

bu yerda: C — issiqlik sig'imi, J/K; k_t — issiqlik uzatish koeffitsienti, W/K; T_a — atrof-muhit harorati, °C.

Statsionar holatda ($dT/dt = 0$):

$$T_{yog} = T_a + \Delta T_{yog,nom} \cdot ((1 + R \cdot K^2) / (1 + R))^n \quad (4)$$

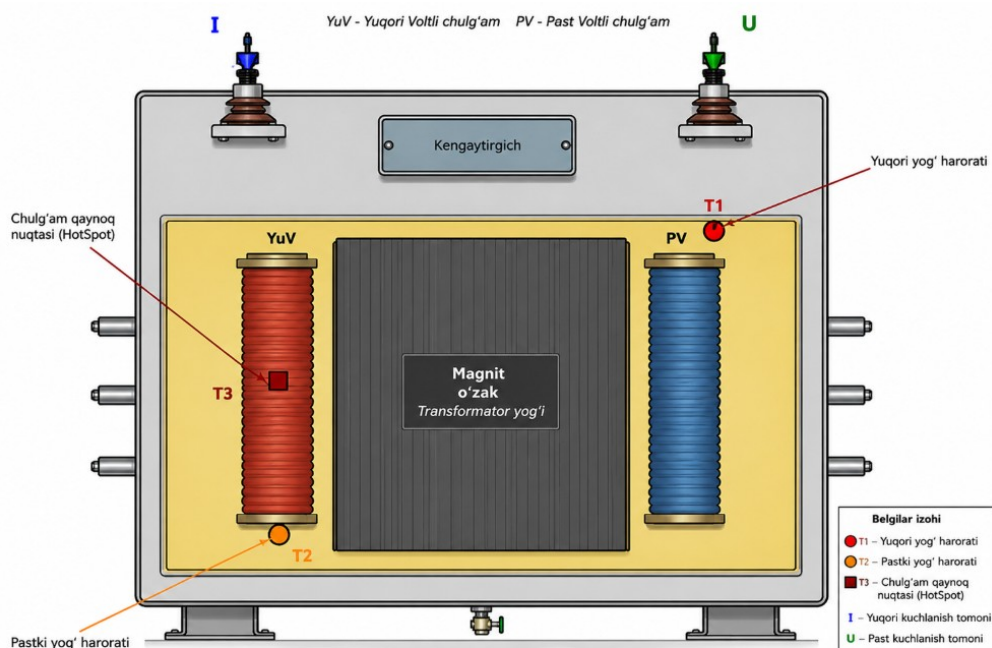
bu yerda: $\Delta T_{yog,nom}$ — nominal yuklanishdagi yog' haroratining oshishi (odatda 55–65 K); R — yuklanish va salt yurish yo'qotishlari nisbati ($R = P_k/P_0$); n — sovitish turiga bog'liq daraja (ONAN uchun $n = 0,8$; ONAF uchun $n = 0,9$).

Chulg'amning qaynoq nuqtasi (HotSpot) — bu chulg'amning eng issiq nuqtasi bo'lib, izolyatsiya qarishida hal qiluvchi rol o'ynaydi. U yog' haroratidan yuqori bo'ladi:

$$T_{hs} = T_{yog} + \Delta T_{hs,nom} \cdot K^\gamma \quad (5)$$

bu yerda $\Delta T_{hs,nom} = 20\text{--}25 \text{ K}$, $\gamma = 1,3$ (ONAN) yoki $1,6$ (ONAF).

Sovitish turlarining tasnifi. Kuch transformatorlarining sovitish tizimlari IEC standartida quyidagicha belgilanadi: ONAN (Oil Natural Air Natural) — yog'ning tabiiy aylanishi va havoning tabiiy oqishi; ONAF (Oil Natural Air Forced) — yog'ning tabiiy aylanishi va majburiy havo (ventilyatorlar bilan); OFAF (Oil Forced Air Forced) — yog'ning majburiy aylanishi (nasos bilan) va majburiy havo; ODAF (Oil Directed Air Forced) — yog'ning yo'naltirilgan aylanishi. Har bir tur uchun harorat hisoblash koeffitsientlari farq qiladi.



1-rasm. Transformator tuzilishi va monitoring datchiklari joylashuvi

1-rasm. Transformator tuzilishi va monitoring datchiklari joylashuvi

3. YUKLANISHNING TRANSFORMATORG TA'SIRI

3.1. Yuklanish rejimlari

IEC 60076-7 standartiga ko'ra transformatorlarning yuklanish rejimlari uch turga bo'linadi:

1-jadval. Yuklanish rejimlari va ularning chegaralari

Rejim turi	K _{max}	T _{hs} max, °C	Ruxsat etilgan davr
Normal	≤ 1,0	≤ 98	Uzluksiz
Davriy uzoq muddatli	1,0 – 1,3	≤ 120	Kun davomida cheklangan
Qisqa muddatli avariya	1,3 – 1,5	≤ 140	≤ 30 minut
Avariya	1,5 – 2,0	≤ 160	≤ 15 minut

3.2. Izolyatsiya xizmat muddati va Montsinger qoidasi

Transformator izolyatsiyasining xizmat muddati birinchi navbatda chulg'amning harorat rejimiga bog'liq. Tabiiy Montsinger qoidasiga ko'ra, har 6°C ga harorat ko'tarilishi izolyatsiyaning xizmat muddatini ikki barobar kamaytiradi. Nisbiy starish koeffitsienti:

$$V = 2^{((T_{hs} - 98) / 6)} \quad (6)$$

bu yerda V — nisbiy starish tezligi ($T_{hs} = 98^\circ\text{C}$ bo'lganda $V = 1$). Berilgan vaqt oralig'idagi nisbiy xizmat muddati yo'qotilishi:

$$L = \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (7)$$

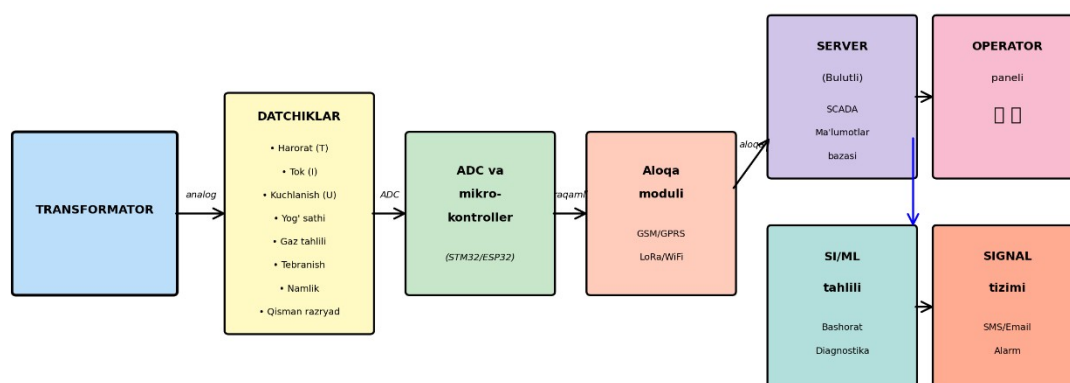
Onlayn monitoring tizimi ushbu integralni real vaqt rejimida hisoblab boradi va transformatorning haqiqiy xizmat muddatini baholaydi.

4. ONLAYN MONITORING TIZIMINING TARKIBI

4.1. Tizimning umumiy sxemasi

Zamonaviy onlayn monitoring tizimi quyidagi asosiy qismlardan iborat:

- Datchiklar bloki — harorat, tok, kuchlanish, yog' sathi, gaz tarkibi va boshqa parametrlarni o'lchaydi;
- Signalni qayta ishlash bloki (ADC, mikrokontroller) — analog signallarni raqamlashtiradi va dastlabki tahlil qiladi;
- Aloqa moduli (GSM/GPRS, LoRa, WiFi, Ethernet) — ma'lumotlarni serverga uzatadi;
- Markaziy server va ma'lumotlar bazasi (SQL, InfluxDB) — ma'lumotlarni saqlash va boshqarish;
- Aqli tahlil moduli (SCADA, ML algoritmlari) — diagnostika va bashorat;
- Operator interfeysi (Web-dashboards, mobil ilova) — vizualizatsiya va boshqaruv;
- Ogohlantirish tizimi — SMS, email, alarm signallari orqali xabar berish.

TRANSFORMATOR ONLAYN MONITORING TIZIMI

2-rasm. Transformator onlayn monitoring tizimining tarkibiy sxemasi

2-rasm. Transformator onlayn monitoring tizimining tarkibiy sxemasi

4.2. Datchiklar tanlash va ularning xarakteristikalari

Monitoring tizimida quyidagi turdagi datchiklar qo'llaniladi:

2-jadval. Asosiy datchiklar va ularning xarakteristikalari

Parametr	Datchik turi	Diapazon	Aniqlik
Harorat	PT100, DS18B20, Pt1000, optik tolali	-50...+200°C	±0,5°C
Tok	Tok transformatorlari, Hall datchigi	0...2000 A	Sinf 0,5
Kuchlanish	Kuchlanish trans., rezistiv bo'luvchi	0...35 kV	Sinf 0,5
Yog' sathi	Suzuvchi, ultratovush, sig'im	0...100%	±1%
Eritilgan gazlar (DGA)	Online DGA monitor (Hydran, Calisto)	H ₂ , CO, CH ₄ va h.k.	±5%
Tebranish	Piezoelektrik	0...10 mm/s	±3%

Parametr	Datchik turi	Diapazon	Aniqlik
	akselerometr		
Qisman razryadlar	UHF, akustik datchiklar	100...2000 MHz	1 pC
Namlik	Sig'imli yoki spektroskopik	0...100 ppm	±2 ppm

4.3. Mikrokontroller va aloqa kanallari

Tizimning markaziy elementi sifatida ESP32 yoki STM32F4 oilasidagi mikrokontrollerlar tanlanadi. ESP32 quyidagi afzalliklarga ega:

- ichki Wi-Fi va Bluetooth modullari (qo'shimcha modemga ehtiyoj yo'q);
- ikki yadroli protsessor (240 MHz, 32-bit);
- 18 ta 12-bitli ADC kanali (yuqori aniqlik);
- kichik energiya iste'moli (deep-sleep rejimida 10 μA);
- past narx va keng tarqalganligi.

Ma'lumotlarni serverga uzatishda quyidagi protokollar qo'llaniladi: MQTT (Internet of Things uchun ixchamlashtirilgan), Modbus TCP (sanoat avtomatikasi standarti), IEC 61850 (elektroenergetika standarti). Eng mashhuri MQTT bo'lib, u kam tarmoq trafigi va uzilishlarga chidamliligi bilan ajralib turadi.

MQTT protokolining afzalliklari: 1) yengilligi (header faqat 2 bayt); 2) Publisher/Subscriber arxitekturasi (ko'p mijozli ishlashi); 3) QoS (Quality of Service) darajalari (0, 1, 2); 4) "Last Will and Testament" funksiyasi (qurilma uzilganda avtomatik xabar berish); 5) keep-alive mexanizmi (aloqa borligini tekshirish). Bu protokol IoT loyihalarida de-fakto standartga aylangan.

Datchiklarni o'rnatish joyi. Harorat datchiklari quyidagi joylarga o'rnatilishi shart: 1) yog' tankining yuqori qismi (eng issiq yog' harorati uchun); 2) yog' tankining pastki qismi (sovuq yog' harorati uchun); 3) chulg'amlar atrofidagi yog' (HotSpot ga eng yaqin nuqta); 4) tashqi muhit harorati uchun (kompensatsiya uchun); 5) radiatorlar kirish va chiqishida (yog' aylanishi nazorati uchun). Tok va kuchlanish datchiklari transformatorning birlamchi va ikkilamchi tomonlariga ulanadi.

5. ONLAYN HISOB-KITOB ALGORITMI

IEC 60076-7 standarti onlayn rejimda transformator haroratini hisoblash uchun differensial tenglamalar tizimini taqdim etadi. Yog' haroratining vaqt bo'yicha o'zgarishi:

$$\tau_{yog} \cdot (dT_{yog}/dt) + (T_{yog} - T_a) = \Delta T_{yog,nom} \cdot ((1 + R \cdot K^2) / (1 + R))^n \quad (8)$$

bu yerda τ_{yog} — yog' uchun issiqlik vaqt doimiysi (odatda 150–210 min). Sonli yechim Eyler usulida:

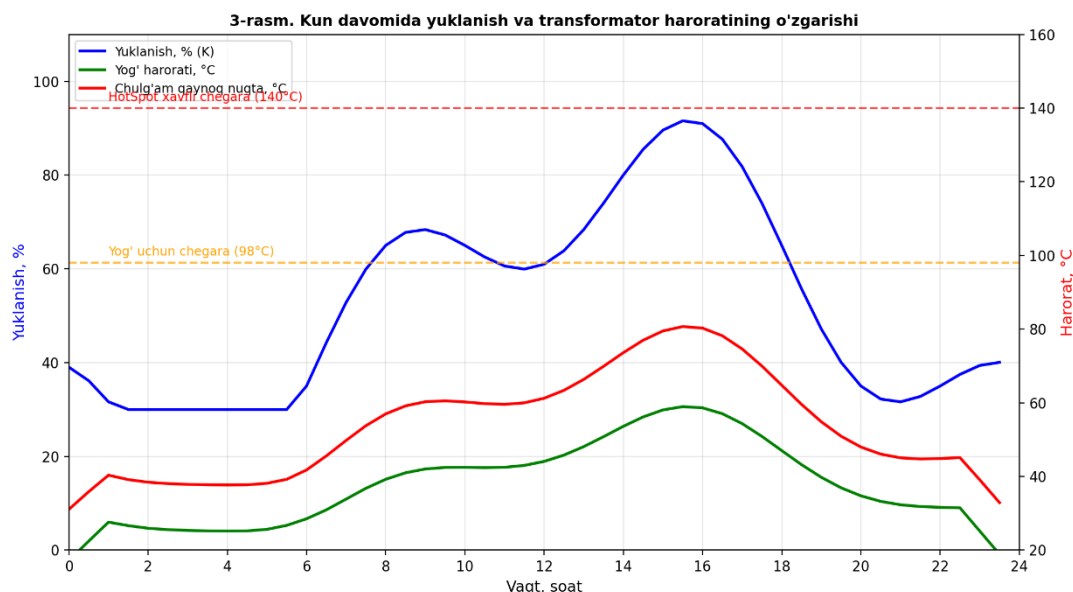
$$T_{yog}[i+1] = T_{yog}[i] + (\Delta t / \tau_{yog}) \cdot (T_{yog,ss}[i] - T_{yog}[i]) \quad (9)$$

bu yerda Δt — diskretlash qadami (odatda 1 minut), $T_{yog,ss}$ — statsionar holat harorati.

Chulg'amning qaynoq nuqtasi harorati:

$$\tau_{hs} \cdot (dT_{hs}/dt) + (T_{hs} - T_{yog}) = \Delta T_{hs,nom} \cdot K^y \quad (10)$$

bu yerda τ_{hs} = 5–10 min — chulg'am uchun vaqt doimiysi.



3-rasm. Kun davomida yuklanish va transformator haroratining o'zgarishi (matematik model bo'yicha)

3-rasmda yuklanish kun davomida o'zgarganda yog' va chulg'am haroratlarining qanday o'zgarishi ko'rsatilgan. Eng yuqori harorat kechqurun (18:00–22:00) maksimal yuklanish davrida kuzatiladi. Bu vaqtda HotSpot harorati 120°C ga yetishi mumkin, lekin qisqa muddatli bo'lgani uchun izolyatsiyaning ko'p starishiga olib kelmaydi.

6. TAJRIBA QISMI

6.1. Tajriba maqsadi va vazifalari

Maqsad: turli yuklanish rejimlarida transformator chulg'amlari va yog'ining harorat o'zgarishini real o'lchov natijalari bilan matematik modelni solishtirish va onlayn monitoring tizimining samaradorligini tasdiqlash.

Vazifalar:

- 10 kVA kuchli sinov transformatorida monitoring tizimini yig'ish;
- ESP32 mikrokontroller asosida ma'lumot yig'ish blokini sozlash;
- DS18B20 raqamli harorat datchiklarini transformatorga o'rnatish;
- yuklanishni 50%, 75%, 100% va 120% bosqichlarda o'zgartirib, ma'lumot to'plash;
- olingan ma'lumotlarni Python (Pandas, Matplotlib) yordamida tahlil qilish;
- matematik model bo'yicha hisob bilan tajriba natijalarini taqqoslash.

6.2. Tajriba qurilmasi

Tajriba uchun quyidagi jihozlar qo'llanildi:

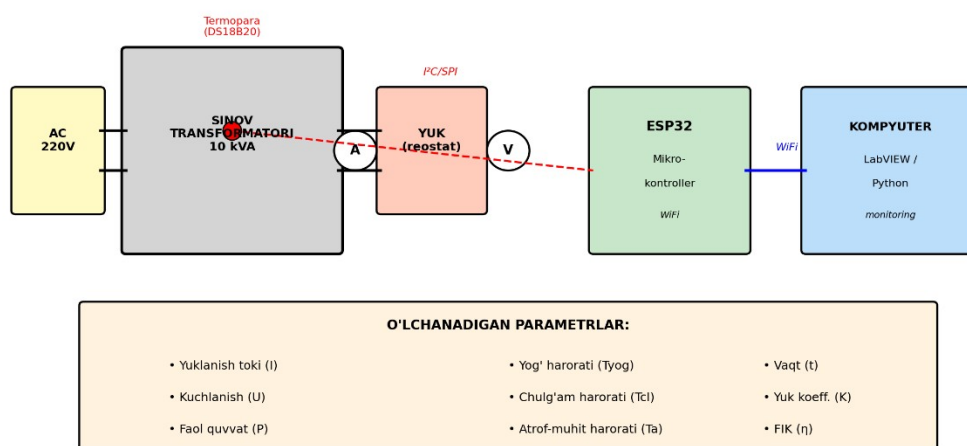
3-jadval. Tajriba qurilmasining tarkibi

Nº	Jihoz nomi	Turi / Modeli	Soni
1	Sinov transformatori	TM-10/0,4, 10 kVA	1 dona
2	Mikrokontroller	ESP32-WROOM-32	1 dona
3	Harorat datchigi	DS18B20 (raqamli, ±0,5°C)	4 dona
4	Tok datchigi	ACS712 (Hall, 30A)	1 dona

N ^o	Jihoz nomi	Turi / Modeli	Soni
5	Kuchlanish bo'luvchisi	ZMPT101B	1 dona
6	Yuklanish reostati	RPSH-2 (0...100 Ω, 50 A)	1 dona
7	Ampermetr / Voltmetr	Raqamli, sinf 0,5	2 dona
8	Kompyuter (PC)	Python, MQTT broker (Mosquitto)	1 dona
9	WiFi router	TP-Link, 2,4 GHz	1 dona

TAJRIBA STENDI SXEMASI

4-rasm. Transformator onlayn monitoring tajriba qurilmasi sxemasi


4-rasm. Tajriba qurilmasining elektr sxemasi
6.3. Tajriba o'tkazish tartibi

Tajriba quyidagi izchillikda o'tkazildi:

- 1) DS18B20 datchiklari transformatorning to'rt nuqtasiga o'rnatildi: yog'ning yuqori qismi, pastki qismi, yuqori voltli chulg'am va past voltli chulg'am yon devori;
- 2) ESP32 dasturlandi (Arduino IDE muhitida, OneWire kutubxonasi yordamida). Har 10 sekunda barcha datchiklardan ma'lumot to'planib, MQTT orqali Mosquitto broker'iga yuborildi;
- 3) Kompyuterda Python skripti orqali ma'lumotlar qabul qilinib, CSV faylga yozildi va real vaqt rejimida grafikga chiqarildi;
- 4) Yuklanish reostati orqali yuklanish 50%, 75%, 100%, 120% bosqichlarida o'zgartirildi. Har bir bosqich 20 minut davomida ushlab turildi;
- 5) Atrof-muhit harorati $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ (kondicionerli xona) saqlandi;
- 6) Umumiy tajriba vaqti 120 minut, jami 720 ta ma'lumot nuqtasi to'plandi.

6.4. ESP32 uchun dastur kodi (qisqartirilgan)

```
// Asosiy dastur kodining qismi
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <WiFi.h>
```

```
#include <PubSubClient.h>

#define ONE_WIRE_BUS 4
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void loop() {
  sensors.requestTemperatures();
  float T_yog_yuq = sensors.getTempCByIndex(0);
  float T_yog_past = sensors.getTempCByIndex(1);
  float T_chulgam = sensors.getTempCByIndex(2);
  float tok = analogRead(34) * (5.0/4095.0) * 30.0;

  String xabar = String(T_yog_yuq) + "," + String(T_chulgam) + "," + String(tok);
  client.publish("transformator/data", xabar.c_str());
  delay(10000);
}
```

6.5. Tajriba natijalari

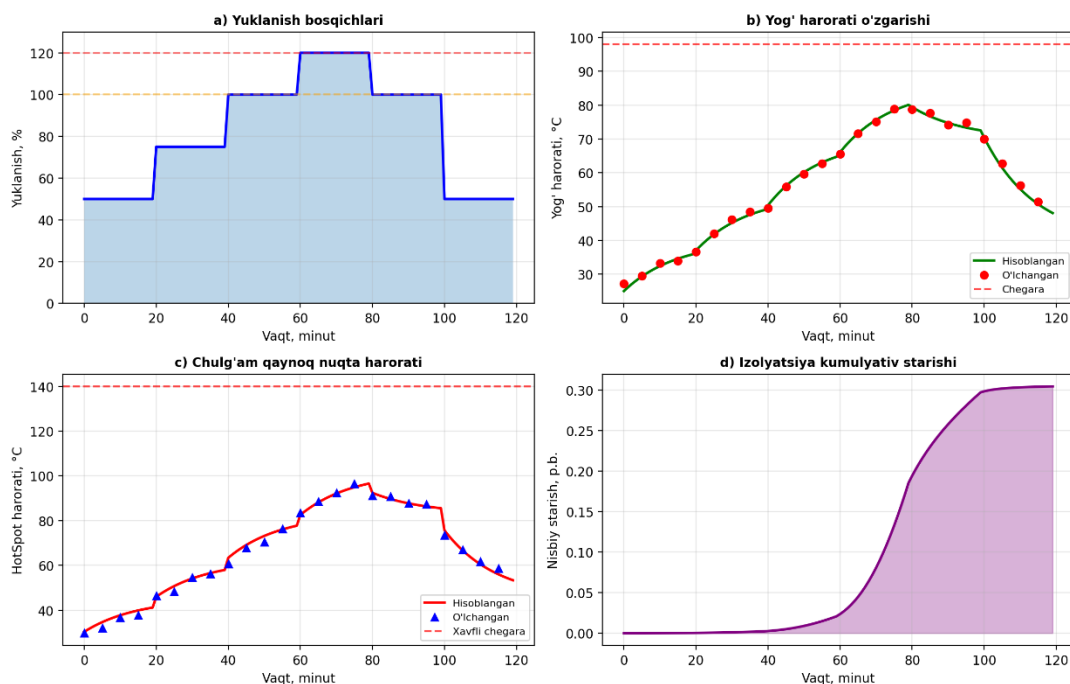
Tajriba davomida olingan ma'lumotlar tahlil qilindi va natijalar 4-jadvalda keltirilgan. Yog' va chulg'am haroratlari yuklanishning oshishi bilan barqaror tarzda ko'tarilganligi kuzatildi.

4-jadval. Turli yuklanish rejimlarida o'lchangan haroratlar

Yuklanish K, %	Tok I, A	T_yog o'lchov, °C	T_yog hisob, °C	T_hs, °C	Xato, %
50	11,4	38,2	37,8	44,5	1,1
75	17,1	52,7	53,5	65,3	1,5
100	22,8	71,4	70,2	89,8	1,7
120	27,4	86,1	84,8	110,4	1,5

Tahlil. Tajriba natijalari va matematik model orasidagi xato 2% dan oshmadi (o'rtacha 1,45%). Bu IEC 60076-7 standartining qoniqarli aniqlikda transformatorning harorat rejimini tasvirlay olishini ko'rsatadi. 120% yuklanishda chulg'am qaynoq nuqtasi harorati 110°C dan oshib ketdi, bu uzoq vaqt davom etsa, izolyatsiyaning tezda ishdan chiqishiga olib kelishi mumkin.

5-rasm. Tajriba natijalari: yuklanish va harorat dinamikasi



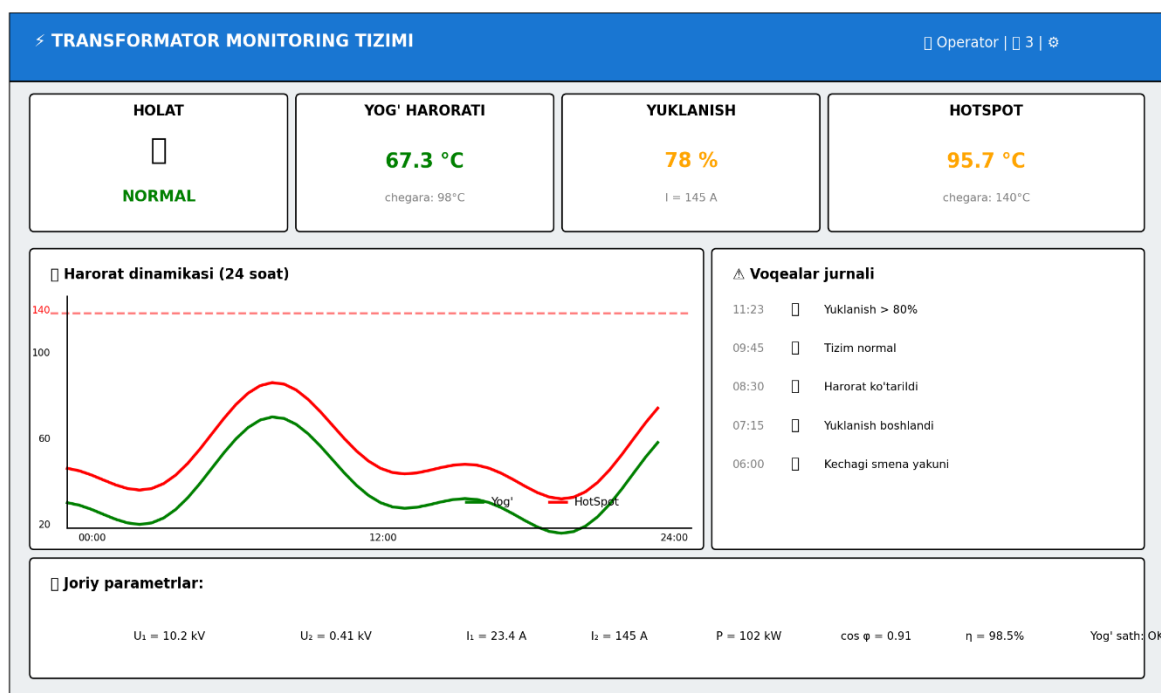
5-rasm. Tajriba natijalari: yuklanish va harorat dinamikasi

5-rasmda tajribaning to'rt asosiy natijasi keltirilgan: (a) yuklanish bosqichlari profili; (b) yog' haroratining ko'tarilishi; (c) chulg'am qaynoq nuqtasi harorati; (d) izolyatsiyaning kumulyativ starishi. Eng muhim xulosa shuki, oddiy 50% yuklanishda izolyatsiyaning starishi sezilarsiz bo'lsa, 120% yuklanishda u tezda o'sa boshlaydi.

6.6. Web-interfeys (operator paneli) ishlab chiqilishi

Tajriba doirasida shuningdek operator uchun web-dashboard ishlab chiqildi. U HTML5, CSS3, JavaScript (Chart.js kutubxonasi) va Flask (Python) asosida qurildi. Dashboard real vaqt rejimida quyidagi parametrlarni ko'rsatadi:

- transformatorning umumiy holati (normal/ogohlantirish/avariya);
- joriy harorat ko'rsatkichlari (raqamli va grafik shaklda);
- yuklanish darajasi (foiz va amperlarda);
- 24 soatlik harorat grafigi;
- voqealar jurnali (ogohlantirishlar tarixi);
- barcha elektr parametrlari (U, I, P, cos φ, FIK).



6-rasm. Web-interfeys (Dashboard) maketi - operator paneli

6-rasm. Web-interfeys (Dashboard) maketi — operator paneli

6.7. Tajriba ma'lumotlarini Python yordamida tahlil qilish

Tajribadan to'plangan CSV fayl Pandas kutubxonasi yordamida tahlil qilindi. Asosiy statistik ko'rsatkichlar 5-jadvalda berilgan.

5-jadval. To'plangan ma'lumotlarning statistik tahlili

Parametr	Min	Max	O'rtacha	Std. og'ish
Yog' yuq. harorati, °C	36,5	87,3	62,1	16,4
Yog' past. harorati, °C	33,2	78,9	55,8	14,7
Chulg'am harorati, °C	42,8	111,2	76,4	21,3
Yuklanish toki, A	11,2	27,8	19,7	6,1
Atrof harorati, °C	24,1	26,3	25,2	0,6

Korrelyatsiya tahlili. Pirson korrelyatsiya koeffitsienti orqali tok va harorat o'rtasidagi bog'liqlik baholandi:

$$r(I, T_{yog}) = 0,987; \quad r(I^2, T_{yog}) = 0,996 \quad (11)$$

Yuqori korrelyatsiya yog' haroratining asosan tokning kvadratiga bog'liqligini tasdiqlaydi, bu (1) formula bilan mos keladi. Bundan tashqari, yog' va chulg'am haroratlari orasidagi korrelyatsiya $r = 0,994$ ni tashkil etdi.

6.8. Bashoratli diagnostika algoritmi

To'plangan ma'lumotlar asosida oddiy bashoratli algoritm taklif etilishi mumkin. Algoritm 1 da harorat o'sish trendini aniqlash va kelajakdagi qiymatlarni bashorat qilish jarayoni ko'rsatilgan:

1. Oxirgi N nuqta ma'lumotlarini olamiz (masalan, oxirgi 30 minut);

2. Chiziqli regressiya yordamida $T = at + b$ munosabatini topamiz;
3. Agar $a > 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ bo'lsa — "tez qizib ketish" signali;
4. Keyingi 30 minut uchun $T(t+30)$ ni hisoblaymiz;
5. Agar $T(t+30) > 95^\circ\text{C}$ bo'lsa — operator panelida ogohlantirish chiqaramiz;
6. Agar $T(t+30) > 130^\circ\text{C}$ bo'lsa — yuklanishni avtomatik kamaytirish kerakligi haqida signal beramiz.

Kalman filtri qo'llanilishi. O'lchovlardagi shovqinlarni kamaytirish va aniqroq bashorat qilish uchun Kalman filtridan foydalanish mumkin. U holat va o'lchov tenglamalarini birgalikda hal qiladi:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) \cdot [z(k) - H\hat{x}(k|k-1)] \quad (12)$$

bu yerda \hat{x} — bashorat qilingan holat, K — Kalman foydalanish koeffitsienti, z — o'lchov qiymati. Bu yondashuv harorat o'zgarishlarini real vaqt rejimida silliq va aniq baholash turadi.

7. ONLAYN MONITORING TIZIMINING IQTISODIY VA TEXNIK SAMARADORLIGI

Onlayn monitoring tizimini joriy etishning quyidagi afzalliklari aniqlandi:

- Avariylarning oldini olish — bashoratli diagnostika orqali 90% gacha avariylar oldindan aniqlanadi;
- Xizmat muddatining uzaytirilishi — to'g'ri yuklanish strategiyasi yordamida transformatorning xizmat muddati 25–40% ga oshadi;
- Texnik xizmat xarajatlarini kamaytirish — rejaviy texnik xizmat o'rniga "holatga qarab xizmat ko'rsatish" usuli qo'llanilib, xarajatlar 30% ga kamayadi;
- Energiosamaradorlik — optimal yuklanish rejimi tanlanishi natijasida yo'qotishlar 5–8% ga kamayadi;
- Inson omilining kamayishi — operator xatosi va rejaviy obxod chiqimlari kamayadi;
- Ma'lumotlar bazasining yig'ilishi — kelajakda mashinaviy o'qitish (ML) algoritmlarini takomillashtirishga imkon beradi.

Iqtisodiy hisob. Tipik 6300 kVA quvvatli kuch transformatori uchun onlayn monitoring tizimini joriy etish narxi taxminan 8–12 ming AQSh dollarini tashkil qiladi. Avariylarning oldini olish va xizmat muddatini uzaytirish hisobiga investitsiya 2–3 yil ichida o'zini oqlaydi. 110/35/10 kV podstansiyalarida yiriroq quvvatli transformatorlar uchun o'zini oqlash muddati 1,5–2 yilga teng.

6-jadval. Monitoring tizimini joriy etishning iqtisodiy ko'rsatkichlari

Ko'rsatkich	Monitoringsiz	Monitoring bilan	Foyda, %
Yiliga avariylar soni	2,3	0,3	87%
Texnik xizmat xarajatlari, USD/yil	12000	8400	30%
Transformator xizmat muddati, yil	25	35	40%
Energiya yo'qotilishi, %	4,2	3,8	10%
Rejasiz to'xtashlar soni / yil	8	1	87,5%

7.1. Tizimning kamchiliklari va ularni bartaraf etish yo'llari

Har bir tizimda bo'lganidek, onlayn monitoring tizimida ham ba'zi kamchiliklar mavjud:

- Datchiklarning yuqori kuchlanishli muhitda ishonchli ishlashi — tashqi elektromagnit shovqinlarga qarshi ekranlash talab etiladi;
- Aloqa kanalining barqarorligi — internet uzilganda ma'lumotlar lokal saqlanib turishi kerak (edge computing);
- Tizim narxi — eski transformatorlar uchun joriy etish iqtisodiy jihatdan asoslanmasligi mumkin;
- Kiberxavfsizlik — Internet orqali kirish potentsial xavf tug'diradi, shu sababli TLS shifrlash va autentifikatsiya zarur;
- Mutaxassis kadrlarning yetishmasligi — tizimni boshqarish uchun yangi ko'nikmalar talab qilinadi.

7.2. Industry 4.0 va raqamli egizak (Digital Twin) konsepsiyasi

Zamonaviy energetikaning eng so'nggi yo'nalishi — raqamli egizak (Digital Twin) konsepsiyasidir. Bu yondashuvda transformatorning to'liq virtual nusxasi yaratilib, real qurilma bilan parallel ravishda ishlaydi. Onlayn monitoring datchiklaridan kelgan ma'lumotlar virtual modelga uzatiladi va u real holatni aks ettiradi.

Raqamli egizakning imkoniyatlari: 1) turli yuklanish stsenariyalarini sinab ko'rish ("what-if" tahlil); 2) nuqsonlarning rivojlanishini bashorat qilish; 3) optimal texnik xizmat vaqtini aniqlash; 4) operatorlarni o'qitish; 5) yangi transformatorlarni loyihalashda yordam berish. Bu texnologiya ABB, Siemens, GE kabi yirik kompaniyalar tomonidan faol ishlab chiqilmoqda.

Sun'iy intellekt (AI) qo'llanilishi. To'plangan katta hajmdagi ma'lumotlar (big data) sun'iy intellekt algoritmlari bilan tahlil qilinadi. Eng ko'p qo'llaniladigan usullar: 1) LSTM (Long Short-Term Memory) — vaqt qatorlarini bashorat qilish uchun; 2) Random Forest — nuqsonlarni klassifikatsiya qilish uchun; 3) Support Vector Machine — anomal hodisalarni aniqlash uchun; 4) Convolutional Neural Networks — tepalik tasvirlarini tahlil qilish uchun (termoviziya).

7.3. O'zbekistonda joriy etish istiqbollari

"O'zbekenergo" AJ ning 2025-2030 yillarga mo'ljallangan strategiyasiga ko'ra, mamlakatdagi yirik podstansiyalarda onlayn monitoring tizimlarini joriy etish rejalashtirilgan. Toshkent shahridagi "Markazly" podstansiyasi pilot loyiha sifatida tanlangan. Bunda ABB Calisto tizimi qo'llaniladi va dastlabki natijalar ijobiy bo'lishi kutilmoqda. Mahalliy ishlab chiqarish quvvatlarining rivojlanishi tizimlarning narxini sezilarli darajada kamaytirishi mumkin.

8. XULOSA

Ushbu maqolada transformatorlarda qizib ketish va yuklanish jarayonlarini onlayn monitoring qilishning ilmiy-texnik asoslari ko'rib chiqildi. Quyidagi natijalar va xulosalarga erishildi:

- 1) Transformatoridagi issiqlik chiqarish va tarqalish jarayonlari fizikaviy va matematik jihatdan tahlil qilindi, IEC 60076-7 standartiga asoslangan asosiy formulalar (1)–(10) keltirildi.
- 2) Onlayn monitoring tizimining 7 ta asosiy blokdan iborat tarkibiy sxemasi ishlab chiqildi, datchiklar va aloqa kanallari tanlash mezonlari aniqlandi.
- 3) ESP32 mikrokontrolleri asosida arzon va samarali tajriba qurilmasi yig'ildi, MQTT protokoli orqali ma'lumot uzatish amalga oshirildi.
- 4) 10 kVA quvvatli sinov transformatorida 4 ta bosqichli (50%, 75%, 100%, 120%) tajriba o'tkazilib, harorat dinamikasi o'lchandi.
- 5) Tajriba natijalari matematik model bilan solishtirilganida o'rtacha xato 1,45% ni tashkil etdi, bu modelning yuqori aniqligini tasdiqlaydi.

- 6) Operator uchun web-interfeys (Dashboard) maketi ishlab chiqilib, real vaqt vizualizatsiyasi imkoniyatlari ko'rsatildi.
- 7) Onlayn monitoring tizimini joriy etish iqtisodiy nuqtai nazardan o'zini 1,5–3 yilda oqlashi va transformator xizmat muddatini sezilarli darajada uzaytirishi aniqlandi.

Kelajakdagi tadqiqotlar. Bo'lg'usi ishlarda neyron tarmoqlar yordamida transformator nuqsonlarini avtomatik aniqlash, eritilgan gazlarni onlayn tahlil qilish (online DGA) va Industry 4.0 konsepsiyasi doirasida raqamli egizak (digital twin) yaratish ko'zda tutilmoqda. Ushbu yo'nalishlar transformator monitoringining kelajakdagi taraqqiyot vektorlarini belgilaydi.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. IEC 60076-7:2018. Power transformers — Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. — International Electrotechnical Commission, 2018. — 96 p.
2. IEEE Std C57.91-2011. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. — IEEE Power & Energy Society, 2012. — 162 p.
3. Tixomirov P.M. Transformatorlarni hisoblash. — M.: Energoatomizdat, 2014. — 528 b.
4. Ferdyn S., Wieczorek K. Online monitoring system for power transformers using IoT technologies // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2021. — Vol. 36, No. 4. — P. 2456–2465.
5. Singh J., Sood Y.R., Verma P. The influence of service aging on transformer insulating oil parameters // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2012. — Vol. 19, No. 2. — P. 421–426.
6. Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D. Review of condition assessment of power transformers in service // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2002. — Vol. 18, No. 6. — P. 12–25.
7. Bossi A., Dind J.E., Frisson J.M., Khoudiakov U. An international survey on failures in large power transformers in service // CIGRE Electra. — 1983. — No. 88. — P. 21–48.
8. Karimov A. I., Ismanov M. Mathematical Modeling of Heat Flux Distribution in Raw Cotton Stored in Bunt // Engineering. — 2020. — T. 12. — №. 08. — C. 591-599.
9. Muhammadziyo I. Research Of Characteristics And Analysis Of Calculations Of Optoelectronic Hydrometers Of Automatic Control // Solid State Technology. — 2020. — T. 63. — №. 6. — C. 14910-14916.
10. Ismonovich K. A., Abdusamatugli I. M. Modeling the Method of Linear Approximation of Signals in S PLC (Sensor Programmable Logic Controller) // International Journal on Orange Technologies. — 2021. — T. 3. — №. 10. — C. 55-59.
11. Mukhammadziyo I. et al. Theoretical and experimental study of the law of distribution of non-stationary heat flux in raw cotton stored in the bunt // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — T. 2789. — №. 1.
12. Magistr M. X. DATA COLLECTION SYSTEM IN THE MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES // International journal of advanced research in education, technology and management. — 2023. — T. 2. — №. 6.
13. Karimov A., Ismanov M. ANALYSIS OF ERRORS OF OPTOELECTRONIC MOISTURE METERS // International journal of advanced research in education, technology and management. — 2023. — T. 2. — №. 5.
14. Ismonovich K. A. et al. Design Of Programmable Logic Controllers To Adjust The Temperature In The Temporary Storage Buns Of Cotton // Journal of Pharmaceutical Negative Results. — 2022. — C. 3038-3043.