



Moyli kuch transformatorlarini kumulyativ zarar asosida diagnostika qilish va boshqarish

Nodirjon O. Ataulloyev¹, San'at Z. Tog'aymurodov^{1,a}

¹ PhD, dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; nodir-82@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-1689-813X>

^{1,a} Doktorant, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; togaymurodovsanat1509@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5345-8250>

Dolzarbli: moyli kuch transformatorlari elektr ta'minoti tizimlarining eng qimmat va mas'uliyatli elementlaridan biri bo'lib, ularning ishdan chiqishi katta iqtisodiy zarar va uzoq muddatli uzilishlarga olib keladi. Mavjud onlayn monitoring vositalari odatda bitta fizik jarayonni (issiqlik rejimi yoki moyda erigan gazlar) nazorat qiladi va qisqa tutashuv toklari, titrash hamda termik qarish ta'sirida to'planadigan zararlarni yagona ko'rsatkichda baholash imkonini bermaydi.

Maqsad: qisqa tutashuv toklari, titrash tezlanishi va eng issiq nuqta harorati ta'sirida to'planadigan kumulyativ zararni hisobga oluvchi matematik model, algoritmi va real vaqtda diagnostika qilish orqali ish rejimlarini boshqarish qurilmasini ishlab chiqish hamda uning samaradorligini baholash.

Usullari: Palmgren–Miner chiziqli zarar to'planishi qoidasi, Arrhenius tenglamasi, Fisher mezoni, ishonchlilik nazariyasining eksponensial modeli, MATLAB/Simulink muhitida imitatsion modellashirish hamda 20 MVA, 110/6 kV transformatorida bir yillik eksperimental tadqiqot.

Natijalar: boshqaruv joriy etilgach kommutatsion zarar ulushi 8,75 % dan 4,86 % gacha, titrash zarari 4,0 % dan 1,6 % gacha, termik degradatsiya 3,28 % dan 0,30 % gacha kamaydi; umumiy yillik zarar 16 % dan 6,8 % gacha (57,5 % ga) pasaydi. Bir yillik buzilmasdan ishlash ehtimoli 0,852 dan 0,934 gacha oshdi, yillik iqtisodiy samara 219 mln so'mni tashkil etdi, qurilmaning qoplanish muddati bir oydan kam.

Kalit so'zlar: moyli kuch transformatori, kumulyativ zarar, diagnostika, titrash tezlanishi, eng issiq nuqta harorati, differensial himoya, qoldiq xizmat muddati, ESP32-S3.

Диагностика масляных трансформаторов на основе кумулятивных повреждений

Нодиржон О. Атауллоев¹, Санат З. Тогаймуродов^{1,a}

¹ PhD, доц., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, 210100, Узбекистан; nodir-82@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-1689-813X>

^{1,a} Докторант, Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, 210100, Узбекистан; togaymurodovsanat1509@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5345-8250>

Актуальность: масляные силовые трансформаторы относятся к наиболее дорогостоящим и ответственным элементам систем электроснабжения, а их отказы приводят к значительному экономическому ущербу и длительным перерывам питания. Существующие средства онлайн-мониторинга, как правило, контролируют один физический процесс (тепловой режим или растворённые в масле газы) и не позволяют оценивать в едином показателе повреждения, накапливающиеся под действием токов короткого замыкания, вибрации и теплового старения.

Цель: разработка математической модели, алгоритма и устройства диагностики с управлением режимами работы в реальном времени, учитывающих кумулятивное повреждение от токов КЗ, виброускорения и температуры наиболее нагретой точки, а также оценка их эффективности.

Методы: правило линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майнера, уравнение Аррениуса, критерий Фишера, экспоненциальная модель теории надёжности, имитационное моделирование в MATLAB/Simulink и годовые экспериментальные исследования на трансформаторе 20 МВА, 110/6 кВ.

Результаты: после внедрения управления доля коммутационных повреждений снизилась с 8,75 до 4,86 %, вибрационных – с 4,0 до 1,6 %, термической деградации – с 3,28 до 0,30 %; суммарное годовое повреждение уменьшилось с 16 до 6,8 % (на 57,5 %). Вероятность безотказной работы за год возросла с 0,852 до 0,934, годовой экономический эффект составил 219 млн сумов, срок окупаемости устройства – менее одного месяца.

Ключевые слова: масляный силовой трансформатор, кумулятивное повреждение, диагностика, виброускорение, температура наиболее нагретой точки, дифференциальная защита, остаточный ресурс, ESP32-S3.

For citation: Ataulloyev N.O., Tog'aymurodov S.Z. Cumulative damage-based diagnostics and control of oil-immersed power transformers. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 152-159. <https://doi.org/10.5281/zenodo.23471752>

Received: 17.04.2026
Revised: 10.05.2026
Accepted: 16.06.2026
Published: 19.10.2026

Copyright: © Nodirjon O. Ataulloyev, Sanat Z. Togaymurodov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Cumulative damage-based diagnostics and control of oil-immersed power transformers

Nodirjon O. Ataulayev¹, Sanat Z. Togaymurodov^{1,a)}

¹ PhD, Assoc. Prof., Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, 210100, Uzbekistan; nodir-82@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-1689-813X>

^{1,a)} PhD student, Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, 210100, Uzbekistan; togaymurodovsanat1509@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5345-8250>

Relevance: oil-immersed power transformers are among the most expensive and critical components of power supply systems, and their failures cause significant economic losses and long outages. Existing online monitoring devices usually track a single physical process (the thermal regime or gases dissolved in oil) and cannot express, in one indicator, the damage accumulated from short-circuit currents, vibration and thermal ageing.

Aim: to develop a mathematical model, an algorithm and a real-time diagnostic device with operating mode control that account for cumulative damage caused by short-circuit currents, vibration acceleration and hot-spot temperature, and to evaluate their effectiveness.

Methods: the Palmgren–Miner linear damage accumulation rule, the Arrhenius equation, Fisher’s criterion, the exponential reliability model, simulation in MATLAB/Simulink and a one-year experimental study on a 20 MVA, 110/6 kV transformer.

Results: after introducing control, the switching damage share decreased from 8.75 % to 4.86 %, vibration damage from 4.0 % to 1.6 % and thermal degradation from 3.28 % to 0.30 %; the total annual damage fell from 16 % to 6.8 % (by 57.5 %). The one-year probability of failure-free operation increased from 0.852 to 0.934, the annual economic benefit amounted to 219 million UZS, and the payback period of the device is less than one month.

Keywords: oil-immersed power transformer, cumulative damage, diagnostics, vibration acceleration, hot-spot temperature, differential protection, remaining useful life, ESP32-S3.

1. Kirish (Introduction)

Moyli kuch transformatorlari elektr ta’minoti tizimlarining eng qimmat va mas’uliyatli elementlaridan biri hisoblanadi. Ularning texnik holatini baholash va qoldiq resursini oldindan aniqlash ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish hamda avariya yuzilishlarning oldini olishning asosiy sharti sifatida qaraladi [1, 2]. Transformator resursi ekspluatatsiya davomida bir necha degradatsiya mexanizmlari ta’sirida kamayib boradi. Birinchidan, tashqi qisqa tutashuvlar va rele himoyasining ishga tushishida chulg’amlarga katta elektrodinamik kuchlar ta’sir etib, ularning radial va aksial deformatsiyasiga olib keladi [3]. Ikkinchidan, magnit o’zak va chulg’amlarning tebranishi natijasida yuzaga keladigan titrash presslash kuchlarining bo’shashiga va mexanik charchashga sabab bo’ladi [4]. Uchinchidan, yuklama toki va atrof-muhit harorati ta’sirida eng issiq nuqta harorati ko’tarilib, qog’oz-moy izolyatsiyasining termik qarishini tezlashtiradi [5–7].

Amaliyotda qo’llanilayotgan onlayn monitoring vositalari, odatda, ushbu mexanizmlardan birini kuzatishga ixtisoslashgan. Masalan, Qualitrol 509 ITM qurilmasi moy, chulg’am va atrof-muhit haroratlarini o’lchab, sovitish tizimini boshqaradi va termik qarish bo’yicha resurs sarfini hisoblaydi [8], GE Hydran M2 qurilmasi esa moyda erigan gazlar va namlikni uzluksiz nazorat qilishga mo’ljallangan [9, 10]. Bunday tizimlarda qisqa tutashuv toklari va titrash ta’sirida to’planadigan mexanik zararlar hisobga olinmaydi, turli mexanizmlar natijalari esa yagona miqdoriy ko’rsatkichga keltirilmaydi. Shuningdek, ular sanoat korxonalarining podstantsiyalarida keng joriy etish uchun nisbatan qimmat hisoblanadi.

Himoya tizimlarini monitoring qilish va boshqarishga oid avvalgi tadqiqotlarda [11] hamda mualliflarning oldingi ishlarida [12, 13] transformatorning ishonchlik ko’rsatkichlarini real vaqtda kuzatish masalalari ko’rib chiqilgan. Ushbu maqolada ularning davomi sifatida uchta degradatsiya mexanizmini – kommutatsion (mexanik), titrash va termik zararlarni yagona kumulyativ ko’rsatkichda birlashtiruvchi matematik model, unga asoslangan algoritim va ESP32-S3 mikrokontrollerida qurilgan diagnostika-boshqaruv qurilmasi taqdim etiladi hamda uning samaradorligi sanoat nimstansiyasida o’tkazilgan bir yillik eksperiment natijalari bo’yicha baholanadi.

2. Usullar va materiallar (Methods and materials)

Tadqiqot obyekti. Tadqiqotlar NKMK AJ GMZ-1 ga qarashli 7-nimstansiyada o’rnatilgan 20 MVA quvvatli, 110/6 kV kuchlanishli uch fazali moyli kuch transformatorida 2025-yil davomida o’tkazildi. Transformatorning modellashirishda foydalanilgan asosiy parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval.** Tadqiqot obyekti – 20 MVA quvvatli moyli kuch transformatorining parametrlari**Table 1.** Parameters of the 20 MVA oil-immersed power transformer under study

Parametr	Belgilanishi	Qiymati
Nominal quvvat	S_n	20 MVA
Yuqori / past kuchlanish	U_1 / U_2	110 / 6 kV
Qisqa tutashuv kuchlanishi	u_k	11,6 %
Chulg'am o'ramlari soni	N	220
Chulg'am radiusi / balandligi	r / h	0,25 / 0,5 m
Chulg'am materialining mustahkamlik chegarasi	σ_{ch}	45 MPa
Himoyaning o'chirish vaqti (boshqaruvsiz)	$t_{o'ch}$	80 ms
Nominal xizmat muddati	L_{nom}	25 yil

Kommutatsion zarar. Qisqa tutashuvlar uch, ikki va bir fazali ko'rinishda sodir bo'lishi mumkinligi sababli, ularning chulg'amlarga ta'sirini yagona o'lchovda baholash uchun ekvivalent qisqa tutashuv toki kiritiladi. Elektrodinamik kuchlar tok kvadratiga proporsional bo'lgani uchun u faza toklari kvadratlarning yig'indisi orqali aniqlanadi:

$$I_{ekv}^2 = I_{qt.a}^2 + I_{qt.b}^2 + I_{qt.c}^2 \quad (1)$$

Chulg'amlarga ta'sir etuvchi aksial va radial mexanik zo'riqishlar $\sigma_a = k_a I_{ekv}^2$ va $\sigma_r = k_r I_{ekv}^2$ ko'rinishida ifodalanadi, bu yerda $k_a = \mu_0 N^2 / (2h^2)$ va $k_r = \mu_0 N^2 / (2\pi r)$ – chulg'am konstruksiyasiga bog'liq koeffitsientlar. Ularning geometrik yig'indisidan natijaviy mexanik zo'riqish olinadi:

$$\sigma_n = \frac{\mu_0 N^2 I_{ekv}^2}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\pi r}\right)^2 + \left(\frac{1}{h^2}\right)^2} \quad (2)$$

bu yerda: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – magnit doimiysi; N – chulg'am o'ramlari soni; r , h – chulg'am radiusi va balandligi, m.

Himoyaning har bir ishga tushishida to'planadigan zarar ulushi natijaviy zo'riqishning material mustahkamlik chegarasiga nisbati va himoyaning o'chirish vaqti orqali, n ta hodisa uchun esa Palmgren–Miner chiziqli yig'indi qoidasi [14] asosida aniqlanadi:

$$D_{d.h} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{n,i}}{\sigma_{ch}} \right)^b \frac{t_{o'ch}}{t_{baz}} \quad (3)$$

bu yerda: σ_{ch} – chulg'am materialining mustahkamlik chegarasi, MPa; b – zarar modelining sezgirlilik parametri (3–8 oralig'ida; yangi transformator va o'rta konservativ yondashuv uchun $b = 5$ qabul qilindi); $t_{o'ch}$ – himoyaning o'chirish vaqti, ms; t_{baz} – o'chirish vaqtining bazaviy qiymati, ms.

Titrash zarari. Titrash tezlanishining tavsiya etilgan qiymatdan ($a_{tav} = 1,5$ m/s²) oshishi transformator konstruksiyasida mexanik charchashni keltirib chiqaradi. Zarar nochiziqli xarakterga ega bo'lgani uchun u ortiqcha tezlanishning kvadratiga proporsional deb qabul qilindi, me'yoriy qiymatdan past tezlanishlarda esa zarar nolga teng deb olinadi. Bir yillik kuzatuv davri uchun oylar kesimida quyidagi ifoda hosil bo'ladi:

$$D_{tit} = \sum_{j=1}^{12} K_{tit} \Delta t_j [\max(0, a_j - a_{tav})]^2 \quad (4)$$

bu yerda: a_j – j -oydagi titrash tezlanishining o'rta qiymati, m/s²; Δt_j – o'ying davomiyligi, soat; K_{tit} – model natijalarini ekspluatatsiya ma'lumotlari bilan moslashtiruvchi normallashtiruvchi koeffitsient.

Termik zarar. Eng issiq nuqta harorati IEC 60076-7 [5] yondashuviga muvofiq atrof-muhit harorati, moy harorati ko'tarilishi va chulg'amning moyga nisbatan harorat gradienti yig'indisi sifatida aniqlanadi:

$$\theta_{ei} = \theta_{muhit} + \Delta\theta_m \left(\frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right)^n + \Delta\theta_{o'r} K^n \quad (5)$$

bu yerda: $\Delta\theta_m$, $\Delta\theta_{o'r}$ – nominal yuklamadagi moy harorati ko'tarilishi va chulg'am harorat gradienti, °C; $K = I/I_{nom}$ – yuklama koeffitsienti; $R = P_1/P_2$ – nominal yuklamadagi chulg'am yo'qotishlarining salt ishlash yo'qotishlariga nisbati; n – transformator konstruksiyasiga bog'liq issiqlik ko'tarilish eksponenti (0,8–1,0).

Izolyatsiyaning qarish tezlanishi Arrhenius tenglamasi bilan, termik degradatsiyadan to'planadigan zarar ulushi esa ekvivalent qarish tezlanishi orqali aniqlanadi:

$$F_{qt} = \exp \left[\frac{E_a}{R_g} \left(\frac{1}{\theta_n + 273,15} - \frac{1}{\theta_{ei} + 273,15} \right) \right] \quad (6)$$

$$D_{iss} = \frac{F_{ekv} t_{um}}{L_{nom}}, \quad F_{ekv} = \frac{\sum_i F_{qt,i} \Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i} \quad (7)$$

bu yerda: $E_a = 120$ kJ/mol – aktivatsiya energiyasi ($E_a/R_g \approx 14\,433$ K); $R_g = 8,314$ J/(mol·K) – universal gaz doimiysi; $\theta_n = 98$ °C – eng issiq nuqtaning me'yoriy harorati; t_{um} – kuzatuv davri; L_{nom} – nominal xizmat muddati.

Integratsiyalashgan model. Uchta mexanizm bo'yicha zarar ulushlari Miner qoidasining chiziqli tamoyiliga ko'ra qo'shiladi va transformator oldindan mavjud bo'lgan zarar D_{eski} hisobga olinadi.

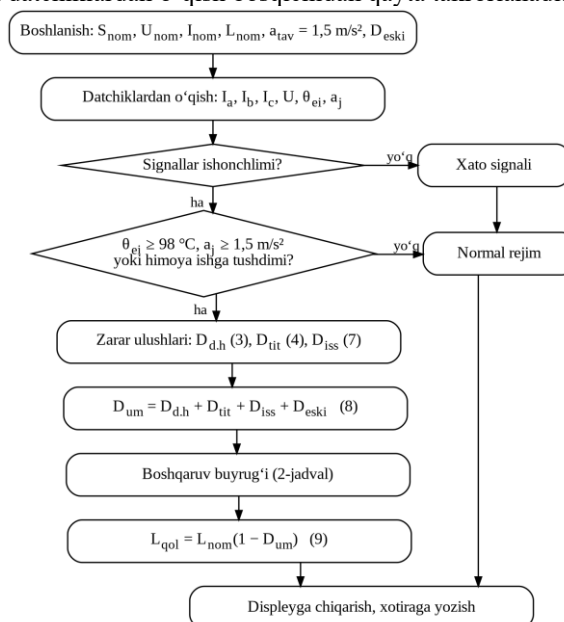
Umumiy kumulyativ zarar va qoldiq xizmat muddati quyidagicha aniqlanadi:

$$D_{um} = D_{d,h} + D_{tit} + D_{iss} + D_{eski} \quad (8)$$

$$L_{qol} = L_{nom}(1 - D_{um}) \quad (9)$$

Modelning adekvatligi Fisher mezon bo'yicha 12 oy davomida olingan 29 ta eksperiment natijalari asosida tekshirildi. Adekvatlik dispersiyasi $S_{ad}^2 = 323,7/26 = 12,45$, tajriba dispersiyasi $S_{taj}^2 = 143,6/28 = 5,13$ ni tashkil etdi. Fisher mezonining hisobiy qiymati $F_{hisob} = 2,43$ jadval qiymatidan ($F_{jad} = 2,49$; $P = 0,99$; $f_1 = 26$; $f_2 = 28$) kichik bo'lgani uchun model 99 % ishonchlilik darajasida adekvat deb topildi.

Diagnostika algoritmi va qurilma. Ishlab chiqilgan model asosida diagnostika-boshqaruv qurilmasining algoritmi tuzildi (1-rasm). Algoritm siklik ishlaydi: datchiklardan faza toklari, kuchlanish, eng issiq nuqta harorati va titrash tezlanishi real vaqtda o'qiladi, signallarning ishonchligi va datchiklarning sozligi tekshiriladi, joriy parametrlar chegaraviy qiymatlar bilan taqqoslanadi. Parametrlar me'yorda bo'lsa, transformator normal rejimda deb qayd etiladi; aks holda (3), (4) va (7) ifodalar bo'yicha zarar ulushlari hisoblanib, (8) ifoda bo'yicha jamlanadi, 2-jadvaldagi mantiq asosida boshqaruv buyrug'i shakllantiriladi va (9) ifoda bo'yicha qoldiq xizmat muddati aniqlanadi. Natijalar displeyga chiqariladi, xotiraga yoziladi va sikl datchiklardan o'qish bosqichidan qayta takrorlanadi.



1-rasm. Moyli kuch transformatorini monitoring asosida diagnostika qilish va ish rejimlarini boshqarish algoritmi

Fig.1. Algorithm of monitoring-based diagnostics and operating mode control of an oil-immersed power transformer

2-jadval. Algoritm shart operatorlarining chegaraviy qiymatlari va boshqaruv ta'sirlari

Table 2. Threshold values of the algorithm conditions and corresponding control actions

Parametr	Normal	Ogohlantirish	Kritik	Boshqaruv ta'siri
$a_i, m/s^2$	$< 1,2$	$1,2-1,5$	$\geq 1,5$	Yuklamani K bo'yicha pasaytirish
$\theta_{ei}, ^\circ C$	< 90	$90-98$	≥ 98	Sovutish tizimini faollashtirish
I_{ekv}, kA	—	—	Himoya ishga tushishi	$t_{o'ch}$ ni 80 dan 50 ms gacha qisqartirish
D_{um}	$< 0,10$	$0,10-0,16$	$> 0,16$	Ogohlantirish va yuklamani cheklash

Qurilmaning apparat qismi ESP32-S3 mikrokontrolleri asosida qurilgan. Eng issiq nuqta haroratini kontaktisiz o'lchash uchun MLX90614 (GY-906) infraqizil datchigi (o'lchash diapazoni $-70...+380$ °C), titrash tezlanishini o'lchash uchun MPU6050 inersial moduli, yuklama toki va kuchlanishni o'lchash uchun galvanik ajratilgan 0–5 V chiqishli Vadias tok va kuchlanish o'zgartkichlari qo'llanildi. Vaqt belgilari DS3231 real vaqt soati (± 2 ppm) orqali shakllantiriladi, datchiklar modulidan boshqaruv blokiga ma'lumotlar 2,4 GHz chastotali FZ0410 radiomoduli orqali 1000 m gacha masofaga uzatiladi, natijalar 7 dyuymli sensorli displeyda aks ettiriladi. Qurilma statsionar va ko'chma rejimlarda ishlay oladi, iste'mol quvvati 15 W ni tashkil etadi.

Algoritm dastlab MATLAB/Simulink muhitida ishlab chiqilgan imitatsion modelda sinovdan o'tkazildi. Bir fazali qisqa tutashuv, yuklama tokining keskin o'zgarishi, izolyatsiya qarshiligining pasayishi va titrash tezlanishining ortishi holatlari birgalikda modellashirilganda integrallangan zarar indeksi 0,1603 ni tashkil etdi, shundan 0,0875 i kommutatsion, 0,0400 i titrash va 0,0328 i termik zararga to'g'ri keldi. Bu qiymat ogohlantirish chegarasidan (0,10) yuqori bo'lib, boshqaruv ta'sirlarini qo'llash

zarurligini ko'rsatdi.

Ishonchlilik va iqtisodiy samaradorlikni baholash. Qurilma samaradorligi bir xil boshlang'ich shartlarda ikki holat – boshqaruvsiz (faqat qayd etish) va boshqaruvli rejimlar uchun taqqoslandi. Umumiy yillik zarar ulushi ekvivalent yillik buzilish chastotasi sifatida qabul qilinib ($\lambda \approx D_{um}$, yil^{-1}), buzilmasdan ishlash va buzilish ehtimollari eksponensial model bo'yicha, iqtisodiy samara va qoplanish muddati esa transformator hamda qurilma tannarxi orqali aniqlandi:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = 1 - R(t) \quad (10)$$

$$E = (\lambda_0 - \lambda_1)C_{tr}, \quad T_{qop} = \frac{C_q}{E} \quad (11)$$

bu yerda: λ_0 , λ_1 – boshqaruvsiz va boshqaruvli rejimlardagi ekvivalent buzilish chastotasi, yil^{-1} ; C_{tr} – transformator tannarxi, so'm; C_q – qurilma tannarxi, so'm; T_{qop} – qoplanish muddati, yil.

3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)

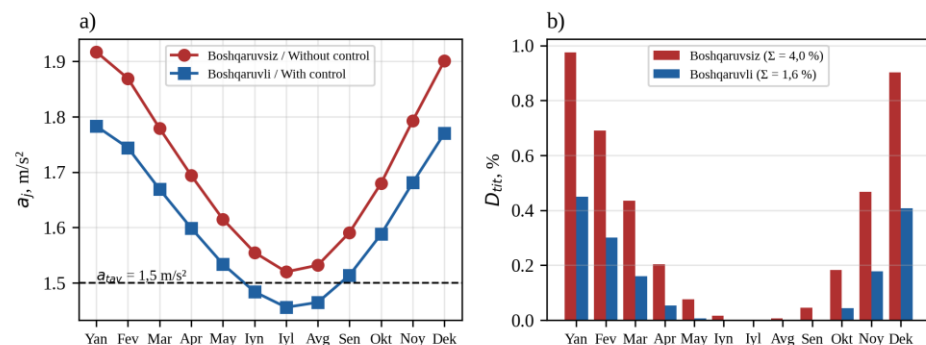
Kommutatsion zararlar. Kuzatuv davrida bir fazali qisqa tutashuvlar natijasida transformator himoyasi 5 marta ishga tushdi. Boshqaruvsiz rejimda ($t_{o'ch} = 80$ ms) har bir hodisa uchun (3) ifoda bo'yicha hisoblangan zarar ulushlari yig'indisi 8,75 % ni tashkil etdi. Qurilma himoyaning o'chirish vaqtini 50 ms gacha qisqartirish buyrug'ini shakllantirgach, xuddi shu hodisalar uchun kommutatsion zarar 4,86 % gacha kamaydi (3-jadval). Nominal 25 yillik resursga nisbatan bu xizmat muddati yo'qotilishining 2,19 yildan 1,22 yilgacha qisqarishiga mos keladi.

3-jadval. Differensial himoyaning ishga tushishidan yuzaga kelgan kommutatsion zararlar

Table 3. Switching damage caused by differential protection operations

№	Oy	I_{ekv} , kA	σ_n , MPa	D_i (80 ms)	ΔL_i , yil (80 ms)	D_i (50 ms)	ΔL_i , yil (50 ms)
1	Dekabr	16,0	32,68	0,02503	0,626	0,01391	0,348
2	Yanvar	14,8	27,96	0,01341	0,335	0,00745	0,186
3	Fevral	15,2	29,49	0,01659	0,415	0,00922	0,231
4	Iyul	15,6	31,07	0,02045	0,511	0,01136	0,284
5	Avgust	14,6	27,21	0,01202	0,301	0,00668	0,167
	Jami			0,08750	2,188	0,04862	1,216

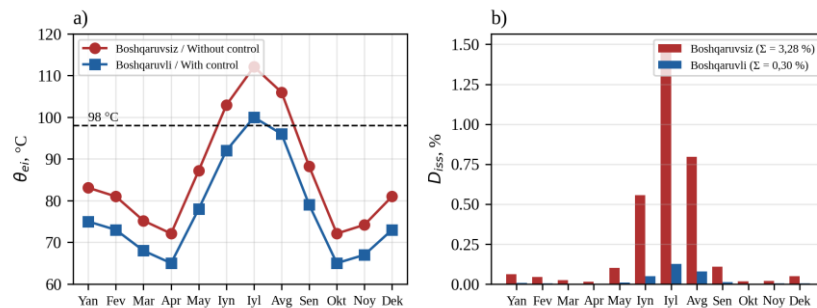
Titrash zararlar. Titrash tezlanishining oylik qiymatlari yuklama bilan bog'liq holda o'zgarib, qish oylarida eng yuqori ($1,90-1,92$ m/s²), yoz oylarida esa eng past ($1,52-1,55$ m/s²) qiymatlarga yetdi. Boshqaruvsiz rejimda tezlanish yil davomida $1,5$ m/s² chegarasidan yuqori bo'lib, (4) ifoda bo'yicha yillik zarar 4,0 % ni tashkil etdi, uning taxminan to'rt dan uch qismi noyabr–fevral oylariga to'g'ri keldi. Qurilma tezlanish chegaradan oshganda yuklama koeffitsientini pasaytirgani (masalan, yanvarda $K = 0,95$ dan $0,86$ gacha) natijasida iyun–avgust oylarida tezlanish me'yoriy qiymatdan pastga tushdi va yillik titrash zarari 1,6 % gacha kamaydi (2-rasm).



2-rasm. Titrash tezlanishining (a) va titrash zararining (b) oylar bo'yicha o'zgarishi

Fig.2. Monthly vibration acceleration (a) and vibration damage (b) without and with control

Termik zararlar. Eng issiq nuqta harorati 98 °C dan faqat iyun ($102,9$ °C), iyul ($112,1$ °C) va avgust ($106,0$ °C) oylarida oshdi, biroq aynan shu uch oyda izolyatsiyaning qarish tezlanishi 1,7–4,4 martaga cha ortib, yillik termik zararining 86 % ini tashkil etdi. Boshqaruvsiz rejimda yillik termik degradatsiya 3,28 % ga teng bo'ldi. Qurilma sovitish tizimini o'z vaqtida faollashtirishi natijasida eng issiq nuqta harorati iyunda 92 °C, iyulda 100 °C, avgustda 96 °C gacha pasaytirildi va yillik termik zarar 0,30 % gacha kamaydi (3-rasm).



3-rasm. Eng issiq nuqta haroratining (a) va termik degradatsiyaning (b) oylar bo'yicha o'zgarishi
Fig.3. Monthly hot-spot temperature (a) and thermal degradation (b) without and with control

Umumiy kumulyativ zarar va ishonchlik ko'rsatkichlari. Uchala mexanizm bo'yicha natijalar (8) ifoda bo'yicha jamlanganda boshqaruvsiz rejimda umumiy yillik zarar ulushi 16 % ni, boshqaruvli rejimda esa 6,8 % ni tashkil etdi, ya'ni zarar 9,2 foiz punktga yoki nisbiy jihatdan 57,5 % ga kamaydi (4-jadval). Mos ravishda transformatorning yaroqlilik indeksi $TYI = (1 - D_{um}) \cdot 100$ % 84 % dan 93,2 % gacha oshdi. Ekvivalent buzilish chastotasi 0,16 yil^{-1} dan 0,068 yil^{-1} gacha pasayib, (10) ifoda bo'yicha bir yillik buzilmasdan ishlash ehtimoli 0,8521 dan 0,9343 gacha oshdi ($\Delta R = 0,0822$), buzilish ehtimoli esa 0,1479 dan 0,0657 gacha kamaydi. Nominal 25 yillik resursga nisbatan yil davomida yo'qotilgan xizmat muddati 4,0 yildan 1,7 yilgacha qisqardi.

Iqtisodiy samaradorlik. Transformator tannarxi $C_{tr} = 2\,380\,425\,000$ so'm bo'lganda kutilayotgan yillik iqtisodiy zarar $Z = \lambda \cdot C_{tr}$ boshqaruvsiz rejimda 380 868 000 so'm, boshqaruvli rejimda esa 161 868 900 so'mni tashkil etdi. (11) ifoda bo'yicha yillik iqtisodiy samara $E = 218\,999\,100$ so'mga teng. Qurilmaning to'liq tannarxi (datchiklar, kontroller, radiomodullar, korpus va loyihalash xarajatlari) $C_q = 13\,710\,000$ so'mni tashkil etib, birinchi yilgi sof samara 205 289 100 so'mga, qoplanish muddati esa $T_{qop} = 0,0626$ yilga (≈ 23 kun) teng bo'ldi.

4-jadval. Boshqaruvsiz va boshqaruvli rejimlarda transformatorning zarar, ishonchlik va iqtisodiy ko'rsatkichlari

Table 4. Damage, reliability and economic indicators of the transformer without and with control

Ko'rsatkich	Boshqaruvsiz	Boshqaruvli	O'zgarish
Kommutatsion zarar D_{dh} , %	8,75	4,86	-44,4 %
Titrash zarari D_{it} , %	4,00	1,60	-60,0 %
Termik degradatsiya D_{ss} , %	3,28	0,30	-90,9 %
Umumiy yillik zarar D_{um} , %	16,0	6,8	-57,5 %
Yaroqlilik indeksi TYI , %	84,0	93,2	+9,2 f.p.
Yo'qotilgan xizmat muddati ($L_{nom} = 25$ yil), yil	4,0	1,7	-2,3 yil
Ekvivalent buzilish chastotasi λ , yil^{-1}	0,160	0,068	-0,092
Buzilmasdan ishlash ehtimoli $R(1)$	0,8521	0,9343	+0,0822
Buzilish ehtimoli $Q(1)$	0,1479	0,0657	-0,0822
Kutilayotgan yillik zarar Z , mln so'm	380,87	161,87	-219,00

Mavjud analoglar bilan taqqoslash. 5-jadvalda taklif etilgan qurilma keng tarqalgan onlayn monitoring vositalari bilan taqqoslangan. Analoglar termik yoki kimyoviy diagnostikaga ixtisoslashgan bo'lsa, taklif etilgan qurilma termik, elektr va mexanik parametrlarni birgalikda nazorat qiladi va ularni yagona kumulyativ zarar ko'rsatkichiga keltiradi. Shu bilan birga, qurilma moyda erigan gazlar tahlilini bajarmaydi, shu sababli u DGA tizimlarining o'rini bosuvchi emas, balki ularni to'ldiruvchi vosita sifatida qaralishi kerak.

5-jadval. Taklif etilgan qurilmaning mavjud analoglar bilan qiyosiy tavsifi

Table 5. Comparison of the proposed device with existing analogues

Ko'rsatkich	Qualitrol 509 ITM (AQSH)	GE Hydran M2 (Kanada)	Taklif etilgan qurilma
Diagnostika turi	Termik	Kimyoviy (DGA)	Termik, elektr, mexanik
Asosiy o'lganadigan parametrlar	Moy, chulg'am va atrof-muhit harorati, yuklama toki	Moyda erigan gazlar, moydagi namlik	Eng issiq nuqta harorati, faza toklari, kuchlanish, titrash tezlanishi
Titrash (mexanik holat) nazorati	Yo'q	Yo'q	Bor
Qisqa tutashuv zararini hisoblash	Yo'q	Yo'q	Bor
Resursni baholash	Termik qarish bo'yicha	Qo'shimcha datchik va modellar bilan	Uch mexanizm bo'yicha kumulyativ zarar
Boshqaruv ta'siri	Sovutish tizimini boshqarish	Signalizatsiya	Yuklamani cheklash, sovuq-ish, t_{vch} ni qisqartirish
Taxminiy narxi*	$\approx 4\,000$ \$	$\approx 10\,000$ \$	$\approx 1\,150$ \$ (13,71 mln so'm)

Olingan natijalarni talqin qilishda quyidagilarni hisobga olish lozim. Birinchidan, model Miner qoidasining chiziqli tamoyiliga asoslangan bo'lib, mexanizmlar o'rtasidagi o'zaro ta'sir (masalan, termik qarigan izolyatsiyaning mexanik mustahkamligi pasayishi) hisobga olinmagan. Ikkinchidan, sezgirlik parametri b va normallashtiruvchi koeffitsient K_{it} bitta transformatorning bir yillik ma'lumotlari bo'yicha kalibrlangan, shu sababli boshqa quvvat va konstruksiyadagi transformatorlar uchun ular qo'shimcha aniqlashtirishni talab etadi. Uchinchidan, iqtisodiy baholashda buzilishdan keladigan zarar transformator tannarxiga proporsional deb qabul qilingan, yuklamani cheklash bilan bog'liq yetkazib berilmagan energiya xarajatlari alohida hisobga olinmagan. Ushbu masalalar keyingi tadqiqotlar mavzusi hisoblanadi.

4. Xulosa (Conclusion)

Moyli kuch transformatorlarida differensial himoyaning ishga tushishidan yuzaga keladigan kommutatsion zarar, titrash tezlanishi natijasidagi mexanik charchash hamda eng issiq nuqta harorati ta'siridagi izolyatsiya degradatsiyasini yagona ko'rsatkichda birlashtiruvchi integratsiyalashgan kumulyativ zarar modeli ishlab chiqildi; uning adekvatligi Fisher mezoni bo'yicha 99 % ishonchlilik darajasida tasdiqlandi ($F_{hisob} = 2,43 < F_{jad} = 2,49$).

Model asosida ESP32-S3 mikrokontrollerida qurilgan diagnostika-boshqaruv qurilmasi va uning algoritmi transformator parametrlarini real vaqtda qayd etib, umumiy zarar ulushi va qoldiq xizmat muddatini hisoblash hamda yuklamani cheklash, sovutishni faollashtirish va himoyaning o'chirish vaqtini qisqartirish buyruqlarini shakllantirish imkonini beradi.

20 MVA, 110/6 kV transformatorlarda o'tkazilgan bir yillik eksperiment natijalariga ko'ra, qurilma joriy etilgach umumiy yillik zarar 16 % dan 6,8 % gacha (57,5 % ga) kamaydi, ekvivalent buzilish chastotasi 0,16 dan 0,068 yil^{-1} gacha pasaydi, bir yillik buzilmasdan ishlash ehtimoli esa 0,8521 dan 0,9343 gacha oshdi.

Yillik iqtisodiy samara 218,999 mln so'mni, qurilma tannarxi hisobga olingandagi birinchi yilgi sof samara 205,289 mln so'mni tashkil etdi, qoplanish muddati bir oydan kam (≈ 23 kun). Qurilmani 110/6–10 kV kuchlanishli boshqa sanoat transformatorlarida bosqichma-bosqich joriy etish maqsadga muvofiq.

ADABIYOTLAR

1. 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.
2. Jahromi A., Piercy R., Cress S., Service J., Fan W. An approach to power transformer asset management using health index // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – Vol. 25, No. 2. – P. 20–34.
3. IEC 60076-5:2006. Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit. – Geneva: IEC, 2006.
4. Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, No. 1. – P. 221–229.
5. IEC 60076-7:2018. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. – Geneva: IEC, 2018.
6. IEEE Std C57.91-2011. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. – New York: IEEE, 2012.
7. Emsley A.M., Stevens G.C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers // IEEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 1994. – Vol. 141, No. 5. – P. 324–334.
8. QUALITROL 509 ITM Intelligent transformer monitor [Elektron resurs]. – URL: <https://www.qualitrolcorp.com/products/ITM509> (murojaat sanasi: 17.09.2026).
9. Hydran M2 transformer monitoring device [Elektron resurs]. – URL: <https://www.gegridsolutions.com/md/catalog/hydranm2.htm> (murojaat sanasi: 17.09.2026).
10. IEC 60599:2022. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. – Geneva: IEC, 2022.
11. Ataullov N., Nizomova D., Norqulov A. Monitoring and control of the protection system of electric drives with the method of pulse-width modulation // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 417. – Art. 03009.
12. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // Journal of Applied Mechanics. – 1945. – Vol. 12, No. 3. – P. A159–A164.



REFERENCES

1. 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.
2. Jahromi A., Piercy R., Cress S., Service J., Fan W. An approach to power transformer asset management using health index // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2009. – Vol. 25, No. 2. – P. 20–34.
3. IEC 60076-5:2006. Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit. – Geneva: IEC, 2006.
4. Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2004. – Vol. 19, No. 1. – P. 221–229.
5. IEC 60076-7:2018. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. – Geneva: IEC, 2018.
6. IEEE Std C57.91-2011. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. – New York: IEEE, 2012.
7. Emsley A.M., Stevens G.C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers // *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*. – 1994. – Vol. 141, No. 5. – P. 324–334.
8. QUALITROL 509 ITM Intelligent transformer monitor [Electronic resource]. – URL: <https://www.qualitrolcorp.com/products/ITM509> (date of access: 17.09.2026).
9. Hydran M2 transformer monitoring device [Electronic resource]. – URL: <https://www.gegridso-lutions.com/md/catalog/hydranm2.htm> (date of access: 17.09.2026).
10. IEC 60599:2022. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. – Geneva: IEC, 2022.
11. Ataulaev N., Nizomova D., Norqulov A. Monitoring and control of the protection system of electric drives with the method of pulse-width modulation // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 417. – Art. 03009.
12. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // *Journal of Applied Mechanics*. – 1945. – Vol. 12, No. 3. – P. A159–A164.