MOYLI TRANSFORMATORLARNI XIZMAT QILISH MUDDATINI ANIQLASHDA YUKLAMA TOKLARINING KORELYATSIYASINI HISOBLASH

Tog‘aymurodov San’at Zafar o‘g‘li
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti doktoranti
E-mail: togaymurodovsanat1509@gmail.com
Rasulova Barchinoy Ilhomiddin qizi
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti doktoranti
E-mail: Rasulova.barchinoy95@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqola moyli transformatorlarda yuklama toki spektri va vaqt bo‘yicha dinamikasidan kelib chiqadigan eng issiq nuqta haroratini modellashtirish hamda izolyatsiya umriga ta’sirini baholashga bag‘ishlangan. Taklif etilgan yondashuvda yuklama ko‘rsatkichi aniqlanadi, yog‘ning yuqori harorati va chulg‘amning eng yuqori harorati issiqlik ko‘tarilish eksponentlari asosida bog‘lanadi. O‘tish jarayonlari eksponensial yaqinlashuv modeli bilan ifodalanadi hamda muhit, yog‘ va o‘ram komponentlarining yig‘ma termik ta’siri sifatida qabul qilinib yakunda yuklama toki va muhit hosil qilgan eng issiq nuqtaning izolyatsiyaga ta’siri hisoblab chiqiladi.

Kalit so‘zlar: Yuklama toki, eksponensial bog‘lanish, nominal harorat, o‘ramlardagi harorat, Arrhenius qonuni, magnit o‘zak, kumulyativ zarar, konstruktiv resurs.

Аннотация: Данная статья посвящена моделированию температуры наиболее нагретой точки, возникающей в результате спектра тока нагрузки и его временной динамики в маслонаполненных трансформаторах, а также оценке её влияния на срок службы изоляции. В предложенном подходе определяется коэффициент нагрузки, при этом температура верхних слоёв масла и температура наиболее нагретой точки обмотки связываются на основе экспоненциальных зависимостей теплового подъёма. Переходные процессы описываются экспоненциальной моделью приближения, а совокупное тепловое воздействие окружающей среды, масла и обмоток рассматривается как единая система. В заключение рассчитывается влияние наиболее нагретой точки, возникающей под действием тока нагрузки и окружающих условий, на изоляцию.

Ключевые слова: ток нагрузки, экспоненциальная зависимость, номинальная температура, температура обмоток, закон Аррениуса, магнитный сердечник, кумулятивное повреждение, конструктивный ресурс.

Annotation: This article is devoted to modeling the hottest-spot temperature arising from the load current spectrum and its time dynamics in oil-immersed transformers, as well as to evaluating its effect on insulation life. In the proposed

ISSN 3030-3907

approach, the load factor is determined, and the top-oil temperature and the winding hottest-spot temperature are linked based on thermal rise exponents. Transient processes are expressed through an exponential approximation model, and the combined thermal influence of the ambient, oil, and winding components is considered. Finally, the impact of the hottest spot generated by the load current and ambient conditions on the insulation is calculated.

Keywords: Load current, exponential relationship, nominal temperature, winding temperature, Arrhenius law, magnetic core, cumulative damage, structural lifetime.

Kirish

Elektr ta’minoti tizimida moyli transformatorlarning xizmat muddati asosan yuklama toki spektri va vaqt bo‘yicha dinamikasidan kelib chiqadigan eng issiq nuqta harorati orqali belgilanadi hamda transformatorlarning yuklama tokining oniy qiymati moy haroratiga ta’sir ko‘rsatadigan asosiy omillardan biri sifatida baholanadi. Amaliy modelda tokning yuklama qiymati (1) formula orqali aniqlanadi [1].

$$K(t)=\frac{I(t)}{I_{nom}} \qquad (1)$$

Bu yerda K(t)– tok yuklanishning ulush qiymati, I(t)– chiquvchi tokning vaqt bo‘yicha oniy qiymati, I_{nom}– transformatorning tokining ma’lumotidagi chiquvchi nominal tok.

(1) ifoda orqali aniqlangan yuklanish darajasi va shu orqali yuklama tokining oniy qiymati nominaldagi bilan taqqoslab olinadi. Yuklama toki transformator haroratining oshishiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi va Arrhenius tipidagi eskirish funksiyasi orqali yo‘qotilgan umr integrallanishi natijasida uning xizmat muddatini o‘zgarishini aniqlash imkoni bo‘ladi. Transformatorlardagi eng issiq nuqta harorati uning chulg‘amlarida bo‘lganligi sababli, $t_{e.i}$– transformatorning eng issiq nuqtasining gradient qiymati ta’sir etuvchi temperaturalarning yig‘indisi sifatida qaraladi hamda izolyatsiya qog‘ozining umrini belgilovchi, moy sifatiga ta’sir ko‘rsatuvchi harorat nuqtasi sanaladi. Uning umumiy ifodasini quyidagicha yozish mumkin [2].

$$t_{e\,i} = t_{muhit}+t_{m.max}+t_{o‘r.max} \qquad (2)$$

Bu yerda: t_{muhit} – muhit harorati, $t_{m.max}$ – moy eng yuqori harorati, $t_{o‘r.max}$ – chulg‘amlarning maksimal harorati $t_{e.i}$ – transformatorni eng yuqori harorat nuqtasini baholovchi miqdorga faqatgina haroratlar yig‘indisi ta’sir ko‘rsatibgina qolmay yuklama tokining yuklanish miqdori ham muhim ahamiyat kasb etadi. (2) formula orqali umumiy holda transformatorlardagi eng issiq nuqta haroratini aniqlash mumkin bo‘ladi [3].

ADABIYOTLAR TAHLILI

Transformatorning yuklama toki uning issiqlik rejimini aniqlovchi asosiy omil hisoblanadi. León-Martínez va boshqalar (2023) yuklama tokining garmonik

ISSN 3030-3907

spektri va uning issiqlik yo‘qotishlariga ta’sirini baholab, harmoniklar natijasida chulg‘am alyuminiy yo‘qotishlari 15–25 % gacha ortishini aniqladilar. Pejovski (2017) esa yuklama tokining shakli va amplitudasi o‘zgarishi transformatorning issiqlik barqarorligini buzishini ko‘rsatadi. Shu sababli, yuklama toki vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan bo‘lganda, issiqlik o‘tish jarayonlari dinamik modellashtirishni talab qiladi. Eng issiq nuqta harorati izolyatsiya qarishining asosiy ko‘rsatkichi sifatida IEEE C57.91-2011 va IEC 60076-7 standartlarida keltirilgan. Arrhenius qonuni bo‘yicha harorat 6 °C ga oshsa, izolyatsiya umrining yarmi kamayadi. Shunga asosan Chen va boshqalar (2024) issiqlik ko‘tarilish eksponentlari yordamida transformatorning issiqlik o‘tish modelini ishlab chiqib, yog‘ va chulg‘am komponentlari uchun vaqt kechikish konstantalarini aniqlashdi. Ularning ishlari transformator ichidagi issiqlik gradientlarini aniqlashda eksponensial yaqinlashuv modelining aniqligini tasdiqlaydi [4,5].

Ko‘plab tadqiqotlar yuklama toki va harorat orasidagi bog‘lanishni eksponensial yoki differensial shaklda ifodalaydi. Masalan, Amrollahi (2011) garmonik yuklar ostida transformator yo‘qotishlari va umrini baholashda termik vaqt konstantasini kiritgan. Unga ko‘ra, issiqlik ko‘tarilish tezligi yuklama tokining kvadratiga proporsional hisoblanadi. Yuqoridagi aniqlanishlarga asosan metodologiyamizni shakllantiramiz.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Moyli transformatorlarda izolyatsion moyning harorati ko‘tarilishini yoki tushishiga asosan yuklama toklarining qiymati ta’sir ko‘rsatadi hamda aniqlangan har bir o‘sish yoki kamayish qiymatlatlari transformatorning haroratiga ham bevosita o‘z ta’sirini ko‘rsatadi. Harorat ortishi transformatorlarning eng issiq nuqtasi, ularning moyining sirt qismidagi haroratga o‘z ta‘sirini ko‘rsatmay qolmaydi. Izolyatsiyaga va transformator haroratiga ta’sir ko‘rsatuvchi nuqta sifatida ayni shu nuqta qaraladi. Shu xulosaga muvofiq eng yuqori haroratga ega nuqta harorati yuklama 237okening qiymatidan kelib chiqib quyidagicha bog‘lanishga ega bo‘ladi [6].

$$T_{max.y} = t_{nom} \cdot \left(\frac{K^2 R+1}{R+1}\right)^n \qquad (3)$$

Bu yerda t_{nom}– transformatorning nominal holatdagi harorati, K – yuklanish darajasi, R–o‘ramdagi yoqotishlarning magnit o‘zakdagi yoqotishlarga nisbati, n–issiqlik ko‘tarilish eksponenti.

(3) formula orqali aniqlangan transformator yog‘ining eng issiq nuqtasi ifodasini yana ham aniqroq shaklda (4) formula bilan ifodalaymiz [7].

$$T_{max.y} = t_{nom} \cdot \left(\frac{K^2 \frac{P_1}{P_2}+1}{\frac{P_1}{P_2}+1}\right)^n \qquad (4)$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda P_1– nominal yuklamadagi o‘ramlardagi yo‘qotishlar, P_2– Magnit o‘zakdagi nominal yuklamadagi yo‘qotishlar

Keyingi qadamda $t_{max.y}$ ning haroratiga chiqquncha qancha harorat ko‘tarilganini aniqlab olamiz

$$\Delta t = t_{max\ y} - (t_{max\ y} - t_0)\, e^{\frac{-\tau}{\tau max}} \qquad (5)$$

Bu yer Δt yog‘ haroratining maksimal harorat va dastlabki harorat o‘rtasidagi farqi, $t_{max.y}$– yog‘ning ustki qismidagi maksimal harorat, t_0– yuklanishdan oldingi harorat, $-\tau$– t_{max}ga chiqish vaqti τ_{max}– maksimal qancha vaqt shu haroat saqlanib turilganligi.

Keyingi qadamda o‘ramlarning haroratini ham e’tiborga olgan holda hisoblaymiz chunki o‘ramlarning qizishi ham izolyatsiya umriga bevosita ta‘sir ko‘rsatadi o‘ramning $t_{e.i}$ ga nisbatan harorati (6) formula orqali aniqlaymiz.

$$T_{o‘r.max}=t_{o‘r.n}\cdot K^m \qquad (6)$$

Bu yerda $t_{o‘r.max}$– o‘ramning maksimal harorati, $t_{o‘r.n}$– o‘ramning nominal holdagi harorati, K– yuklanish darajasi, m– termik yuklama eksponenti.

Keyingi bosqichda o‘ram harorati dastlabki bilan taqqoslaganda qanchaga oshganligini aniqlab olamiz [8].

$$\Delta t_{o‘r}=t_{o‘r.max}-(t_{o‘r.max}-t_{o‘r.n})e^{\frac{-\tau}{\tau max}} \qquad (7)$$

Yakunda izolyatsiyaning qarishiga sabab bo‘ladigan umumiy haroratlarning yig‘indisi orqali eskirish va qarish jarayonini aniqlaymiz. (8) formula moyli transformatorlarda izolyatsiyaga eng ko‘pi bilan qancha harorat ta’sir etishini aniqlash formulasi bo‘lib bu orqali izolyatsiyaning yuklama tokining o‘zgarishi natijasida qanchaga qarishini aniqlash imkonini beradi.

$$T_{e.i}=t_{tashqi}+t_{o‘r}+t_{moy} \qquad (8)$$

Eng asosiy va hal qiluvchi qadam hisoblanadigan izolyatsiyaning qarish tezligini aniqlash aniq ketma ketlik asosida davom etmay exponensial ko‘rinishda o‘zgarib uni hisoblash uchun reaksiya tezligi qanchaga tezlashganini aniqlashga qaratilgan Arrhenius tenglamasidan foydalanamiz chunki Arrhenius tenglamasi reaksiyaning qanchalik tez amalga oshishi hamda jarayonni borishi qanchalar tezlashganligini aniqlashda qo‘llaniladigan asosiy qonun hisoblanadi [9].

MUHOKAMA VA NATIJALAR

Transformatorning konstruktiv resursini xizmat muddati yuqoridagilarga asosan aniqlanadi hamda qarish tezlanishi (9) formula orqali aniqlanadi.

$$F_{AA}(t)=exp\left(\frac{\frac{E_a}{R}}{t_n+273.15}-\frac{\frac{E_a}{R}}{t_{e.i}+273.15}\right) \qquad (9)$$

Bu yerda E_a– furanlar ajralishida talab qilinadigan energiya miqdori yoki aktivatsiya energiyasi R– universal gaz doimiysi t_n – transformatorning normal temperaturasi ishlash holatidagi $t_{e.i}$– transformatorning eng issiq nuqtasining

ISSN 3030-3907

harorati. Hisoblashlar ayni bir vaqt uchun endi jarayon murakkablashsa ko‘rinish farq qiladi va har bir oraliq vaqt uchun Arrheniuss qonunini qo‘llash shart hisoblanadi.

Shunga muvofiq quvvat 20MVA va kuchlanishi 110/6KV li transformatordan olingan qiymatlar asosida metodologiyani tadqiq qiladigan bo‘lsak, 1-jadval ma’lumotlariga tayanib yuklama tokining o‘zgarishini ko‘rib chiqamiz.

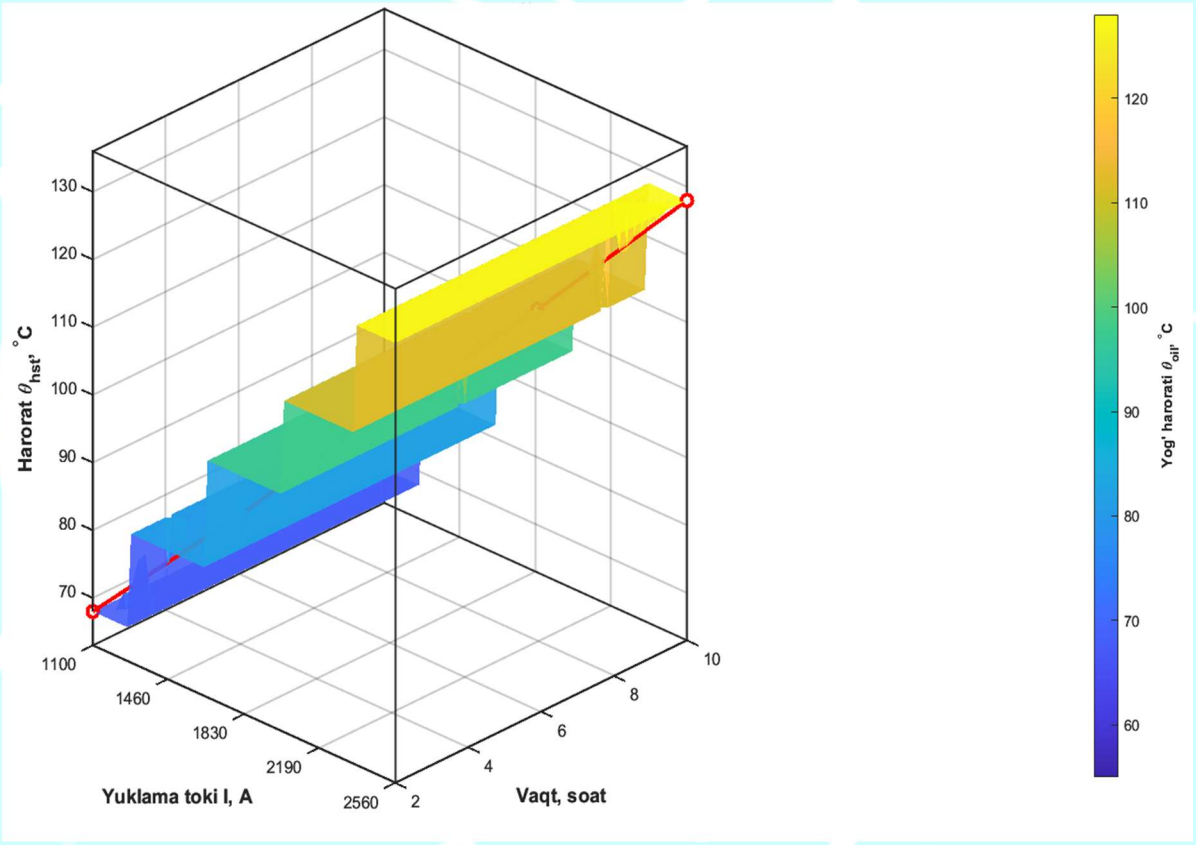
1-jadval

Yuklama tokining o‘zgarishi va unga bog‘liq issiqlik parametrlari

№	Yuklanish darajasi (Load level, %)	Yuklama toki (I, A)	Eng issiq nuqta harorati (θhst, °C)	Yog‘ harorati (θoil, °C)	Vaqt (t, soat)
1	60 % (yengil yuklama)	1100	68	55	2
2	80 % (normal ish rejimi)	1460	82	65	4
3	100 % (nominal yuklama)	1830	98	75	6
4	120 % (qisqa muddatli ortiqcha yuk)	2190	112	85	8
5	140 % (avariyaviy yuklama)	2560	128	96	10

1-jadvalga muvofiq yuklama toklarini simulyatsiyasini MATLAB SIMULINK dasturida tekshirib ko‘ramiz hamda natijada yuklama toklarining haroratga bog‘liqlik korelyatsiyasini 3D ko‘rinishda hosil qilamiz.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Yuklama toklarining haroratga bog‘liqlik 3D ko‘rinishi

Olingan xulosalarga movofiq, harorat o‘zgarishining ekvivalent qarish tezlanishini aniqlab olamiz. Chunki moyli transformatorlarda harorat o‘zgarishi, yuklama toklarining oniy qiymatlari bir xil bo‘lmasligi sababli izolyatsiyaning qarish tezlanishi ayni bir qonuniyat ketma-ketligi bo‘yicha o‘zgarmaydi. Ayni shu sabab uchun ham qarish tezlanishining ekvivalent qiymatini (10) ifoda orqali aniqlaymiz hamda maqsad qilingan yuklama toklari ta’sirida izolyatsiyaning eskirishini eksponensial ifodasini hosil qilamiz [10-14].

$$F_{EQA}=\frac{\sum_{i=1}^{n} F_{AA}\Delta t}{\sum_{i=0}^{n} \Delta t} \qquad (10)$$

XULOSA VA TAKLIFLAR

Maqoladagi analiz va tahlillar asosida xulosa shundan iboratki, transformatorda qarish tezlanishi aniqlangandan so‘ng bevosita umrni hisoblash imkoniyati mavjud bo‘ladi. Aniqlanishlar va ketma-ketliklar faqat yuklama tokining o‘zgarishiga qarab xulosa qilingan, transformatorlarda boshqa kumulyativ zarar ulushlari ham transformator umrini qisqarishiga sabab bo‘ladi. Transformatorlarning titrashi natijasida yuzaga keladigan mexanik zararlarning yig‘indisi, transformator differensial himoyasidan olinadigan va transformator himoya tizimlarining ishlashi natijasida yuzaga keladigan kumulyativ zararlarning yig‘indisi ham transformatorlarni konstruktiv resurslarining qisqarishiga sabab bo‘ladigan boshqa omillar sirasiga kiradi.

ISSN 3030-3907

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Tog‘aymurodov S.Z., Ataullayev N.O., Rasulova B.I “Moyli transformatorlarni qolgan xizmat qilish muddatini birlamchi parametrlaridan kelib chiqqan holda tashxislash” Konchilik Xabarnomasi jurnali, Navoiy 2025 DOI:10.54073/GV.2025.3.102.021, 98-103 betlar
2. S.Z. Tog‘aymurodov “Transformatorlarning ishlash jarayonlarida temperaturaning o‘zgarishi va uning ta‘sir natijasida magnit o‘zakning ferromagnit xususiyatini yo‘qotish sabablari” Journal of Advances in ENERGY Engineering Technology Vol.6(18) Navoi, 2025, 37-41 betlar
3. Ataullayev A.O., Tog‘aymurodov S.Z. “Transformatorlarda magnit o‘tkazgichlarining tashqi elektr maydonini kuchaytirishi sabablari” Farg‘ona davlat texnika universiteti ilmiy texnik jurnali–2025/29/4 Farg‘ona, 103-107 betlar.
4. V. León-Martínez, E. Peal, C. A. M. Montero, L. M. Cárdenas, “Assessment of Load Losses Caused by Harmonic Currents”, *Environments*, 2023, Article ID 177, 1-17 betlar
5. JRB Leynes, “Design of a Load Monitoring System for a Distribution Transformer”, *European Journal of Engineering and Technology Research (EJ-ENG)*, 2024, 12-17 betlar
6. D. Pejovski, “Impact of different harmonic loads on distribution transformer”, *Procedia Engineering*, Elsevier, 2017, Vol. [4], 28-33–betlar
7. J. Faiz, “Derating of transformers under non-linear load current and harmonics”, *IET Electric Power Applications*, 2015, Vol. 9, No. 6, 402– 409 betlar
8. H. Chen et al., “Assessment of voltage harmonics’ impact on the maximum temperature in transformers”, *Scientific Reports*, 2024, 63-69 betlar
9. Александров Г.Н. Режимы работы трансформаторов // Учебное пособие / Санкт-Петербург 2006 г. 143. с.
10. Серебряков А.С. Трансформаторы // Учебное пособие для вузов /Издательский дом МЭИ, -Москва 2013г. 361. с.
11. О.У. Зохидов, М.В. Меркулов. Исследование потенциала и эффективности применения возобновляемой энергии на горных предприятиях Республики Узбекистан. Новые идеи в науках о Земле, 2021г. 57-61 с.
12. O.U. Zokhidov, O.O. Khoshimov, S.S. Khalilov. Experimental analysis of microges installation for existing water flows in industrial plants. E3S Web of Conferences, 2023.
13. О.У. Зохидов, Б.Х. Шомуродов. СБШ-250МН бурғилаш дастгоҳи қурилмаларининг энергия самарадорлигини ошириш бўйича илмий таҳлил ва техник ечимлар. Илм-фан ва инновацион ривожланиш/Наука и инновационное развитие, 2024 г. 42-51с.

ISSN 3030-3907

14. S.K. Alimhodzhaev, O.U. Zakhidov, M.H. Taniev Asynchronous phase rotor generators for power planes operating parallel with a network. Journal of Tashkent Institute of Railway Engineers, 2019 y. 79-86 p.p.

ISSN 3030-3907