

**UCH FAZALI IKKI CHULG‘AMLI MOYLI TRANSFORMATORLARNING ISSIQLIK REJIMINI PYTHON DASTURI ASOSIDA MODELLASHTIRISH VA TADQIQ QILISH****Taniyev Mirzoxid Xurramovich**

“Elektr mashinalari va yuritmalari muhandisligi” kafedrası dotsenti,  
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

**Bekishev Allabergen Yergashevich**

“Elektr mashinalari va yuritmalari muhandisligi” kafedrası dotsenti,  
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

**E-mail:** [allabergenbekisev@gmail.com](mailto:allabergenbekisev@gmail.com) ORCID: 0000-0003-3019-2050

**Omonboyev Dilruh Nuraddin o‘g‘li**

“Elektr mashinalari va yuritmalari muhandisligi” kafedrası magistranti.  
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

Muhandis “NURA group” MCHJ

**E-mail:** [omonboyevdilruh7799@gmail.com](mailto:omonboyevdilruh7799@gmail.com)

**Ahmedov Jaloliddin To‘ranazarovich**

“Gidroenergetika va gidravlika” kafedrası magistranti.  
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti. Muhandis “Gidroloyiha” AJ

**E-mail:** [ahmedovjaloliddin@tdtu.uz](mailto:ahmedovjaloliddin@tdtu.uz) ORCID: 0000-0003-2936-4385

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18228456>

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada uch fazali ikki chulg‘amli moyli transformatorlarning issiqlik rejimi tahlil qilinib, ularni Python dasturi asosida modellashtirish usullari bayon etiladi.

*Transformatorning issiqlik dinamikasiga ta’sir etuvchi asosiy omillar — yuklama rejimi, moyning konvektiv harakati, magnit o‘tkazgichdagi isroflar hamda izolyasiya materiallarining termo-fizik xususiyatlari o‘rganildi. Tadqiqotda analitik issiqlik hisoblari bilan bir qatorda Python muhitida sonli modellashtirish algoritmlari ishlab chiqildi. Olingan natijalar moyli transformatorlarning ishonchliligini oshirish, issiqlik jarayonlarini oldindan baholash hamda optimal sovitish tizimini tanlashda amaliy ahamiyatga ega.*

**Аннотация.** This article analyzes the thermal regime of three-phase two-winding oil transformers and describes their modeling methods based on the Python programming environment.

*The main factors influencing the thermal dynamics of transformers — load conditions, convective oil flow, losses in the magnetic core, and thermo-physical properties of insulation materials — are investigated. Along with analytical thermal calculations, numerical modeling algorithms in Python were developed. The obtained results can be used to improve the reliability of oil transformers, to predict thermal processes, and to select the optimal cooling system.*

**Abstract.** В данной статье анализируется тепловой режим трехфазных двухобмоточных масляных трансформаторов и описываются методы их моделирования на основе программной среды Python. Изучены основные факторы, влияющие на тепловую динамику трансформатора: режим нагрузки, конвективное движение масла, потери в магнитопроводе и термофизические свойства изоляционных материалов. Наряду с аналитическими тепловыми расчетами разработаны численные алгоритмы моделирования в Python. Полученные результаты могут быть использованы для повышения надежности масляных трансформаторов, прогнозирования тепловых процессов и выбора оптимальной системы охлаждения.

*Kalit soʻzlar: uch fazali transformator, issiqlik rejimi, Python dasturi, modellash, issiqlik dinamikasi, sovitish tizimi.*

## **Kirish**

Zamonaviy elektroenergetika tizimida kuch transformatorlari elektr energiyasini uzatish va taqsimlash jarayonlarining asosiy boʻgʻini hisoblanadi. Transformatorlarning ishonchli va samarali ishlashi ularning issiqlik rejimi bilan bevosita bogʻliq boʻlib, haddan tashqari qizish himoya tizimining tez eskirishi, quvvatning kamayishi va avariya holatlarning yuzaga kelishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun moyli transformatorlarda issiqlik jarayonlarini chuqur oʻrganish, modellash va tahlil qilish elektrotexnika sohasida dolzarb ilmiy va amaliy masalalardan biridir.

Uch fazali ikki chulgʻamli moyli transformatorlarda issiqlik almashinuvi murakkab koʻp komponentli jarayon boʻlib, unda choʻlgʻam, magnit oʻzak, transformator moyi hamda tashqi muhit oʻrtasidagi konveksiya va nurlanish jarayonlari oʻzaro taʼsir qiladi. Transformatorning yuklama rejimi, sovitish sharoiti va konstruktiv parametrlarining oʻzgarishi issiqlik taqsimotiga sezilarli taʼsir koʻrsatadi. Mazkur jarayonlarni anʼanaviy analitik usullar yordamida hisoblash koʻp hollarda soddalashtirishlarni talab qiladi, bu esa natijalarning aniqligini kamaytiradi.

Soʻnggi yillarda raqamli modellash va kompyuter dasturlari asosida issiqlik jarayonlarini tahlil qilish usullari keng qoʻllanilmoqda. Python dasturlash tili ilmiy hisoblash, vizualizatsiya va modellash imkoniyatlari kengligi sababli transformatorlarning issiqlik rejimini tadqiq qilish uchun qulay dasturlash tili hisoblanadi. Raqamli model yordamida transformatorning turli ekspluatatsion rejimlarida maksimal qizish harorati, issiqlik taqsimoti hamda sovitish tizimining samaradorligini baholash mumkin.

Ushbu maqolada uch fazali ikki chulgʻamli moyli transformatorlarning issiqlik rejimi Python dasturi asosida raqamli modellash tizimida va tahlil qilinadi. Issiqlik jarayonlarining matematik modeli ishlab chiqiladi, asosiy harorat koʻrsatkichlari hisoblanadi va natijalar grafik koʻrinishda taqdim etiladi. Tadqiqot natijalari transformatorlarning ekspluatatsion ishonchligini oshirish, optimal sovitish rejimini tanlash hamda konstruktsiyani takomillashtirish boʻyicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqishga xizmat qiladi.

## **Asosiy qism**

### **1. Uch fazali ikki chulgʻamli moyli transformatorlarning issiqlik jarayonlari**

#### **1.1. Transformatorlarda issiqlik hosil boʻlishining fizik mohiyati**

Kuch transformatorlarida issiqlik hosil boʻlishi asosan elektr va magnit jarayonlar natijasida yuzaga keladi. Transformator choʻlgʻamlarida oqib oʻtuvchi tok natijasida mis qarshiligida aktiv yoʻqotishlar sodir boʻladi va ular Joule-Lenz qonuni asosida issiqlikka aylanadi. Bundan tashqari, magnit oʻzakda gʻovaklanish (gisterizis) va uyurma toklar natijasida qoʻshimcha issiqlik yoʻqotishlari yuz beradi. Hosil boʻlgan issiqlik transformator moyi orqali tashqi muhitga uzatiladi va sovitish tizimi yordamida muvozanat rejimi taʼminlanadi.

Issiqlik balansi buzilganda, yaʼni ishlab chiqarilgan issiqlik miqdori chiqarib yuborilayotgan issiqlikdan ortib ketganda, transformator detal va elementlarining harorati koʻtarila boradi. Haroratning meʼyorlardan oshib ketishi izolyatsiya materiallarining dielektrik xossalari yomonlashtiradi, eskirish tezligini oshiradi va agregatning xizmat qilish muddatini keskin kamaytiradi. Shu sababli issiqlik rejimini tahlil qilish transformatorlarning ishonchli ishlashini taʼminlashda asosiy omillardan biri hisoblanadi.

#### **1.2. Issiqlik almashinuvi turlari va ularning transformatorlardagi roli**

Moyli transformatorlarda issiqlik almashinuvi quyidagi asosiy mexanizmlar orqali amalga oshadi:

- **issiqlik o'tkazuvchanlik**
- **tabiiy va majburiy konveksiya**
- **nurlanish (radiatsiya)**

Cho'lg'am va o'zakdan moyga issiqlik o'tkazuvchanlik orqali uzatiladi. Transformator moyi esa o'z navbatida tabiiy konveksiya oqimlarini hosil qilib, issiqlikni yuqori qismga ko'taradi. Sovitish tizimi nasos yordamida majburiy konveksiya hosil qilishi mumkin. Radiatsiya asosan transformator bakining tashqi yuzasidan tashqi muhitga issiqlik uzatishda sezilarli rol o'ynaydi.

Issiqlik almashinuvi intensivligi quyidagi omillarga bog'liq:

- transformator yuklama darajasi
- moyning fizik-mexanik xossalari
- tashqi muhit temperaturasi
- sovitish tizimi turi (ONAN, ONAF, OFAF va boshqalar)
- konstruktsion parametrlari

### **1.3. Issiqlik rejimini tavsiflovchi asosiy harorat ko'rsatkichlari**

Moyli transformatorlarda issiqlik rejimini baholashda quyidagi asosiy parametrlar qo'llaniladi:

- yuqori qatlam moy harorati (Top-oil temperature)
- cho'lg'amning issiq nuqta harorati (Hot-spot temperature)
- o'rtacha cho'lg'am harorati
- tashqi muhit harorati

Hot-spot harorati transformator izolyatsiyasining termik eskirishi bilan bevosita bog'liq bo'lgan eng muhim ko'rsatkich hisoblanadi. Shu sababli zamonaviy standartlarda aynan shu parametr asosiy nazorat mezonini sifatida qabul qilingan.

## **2. Issiqlik jarayonlarining matematik modeli**

### **2.1. Issiqlik balansi tenglamalari**

Issiqlik jarayonlari energiya saqlanish qonuni asosida matematik ifodalanadi.

Transformatorning issiqlik balansi quyidagicha yozilishi mumkin:

- hosil bo'lgan issiqlik quvvati
- tashqi muhitga chiqarilgan issiqlik quvvati
- ichki energiya o'zgarishi

Issiqlik balansi differensial tenglamalar ko'rinishida ifodalanib, vaqt bo'yicha haroratning o'zgarishini aniqlashga imkon beradi. Ko'p qatlamli modellashtirishda o'zak, cho'lg'am va moy uchun alohida tenglamalar tuziladi.

### **2.2. Konveksiya va nurlanish tenglamalari**

Konvektiv issiqlik almashinuvi Nyuton-Rixman qonuniga asosan, nurlanish esa Stefan-Boltsman qonuni yordamida hisoblanadi. Bu tenglamalar issiqlik oqimini aniqlash va harorat maydonini modellashtirishda qo'llaniladi.

## **3. Python dasturi asosida issiqlik jarayonlarini modellashtirish**

Mazkur tadqiqotda uch fazali ikki chulg'amli moyli transformatorning issiqlik rejimi Python dasturi yordamida raqamli modellashtirildi. Modelda transformatorning aktiv yo'qotishlari, moyning fizik xossalari, tashqi muhit harorati hamda konvektiv issiqlik almashinuvi sharoitlari hisobga olindi.

Dastur quyidagi bosqichlarni bajaradi:

1. Transformator va moyning fizik-parametrlarini kiritish.
2. **Top-oil** haroratining vaqt bo'yicha o'zgarishini differensial tenglama asosida hisoblash.
3. Hosil qilingan natijalardan **Hot-spot** haroratini aniqlash.
4. Moy kanali bo'yicha **2D harorat taqsimotini** hisoblash.
5. Issiqlik berish yuzasining (radiator) o'zgarishi ta'sirini **parametrik tahlil** qilish.
6. Grafik ko'rinishda natijalarni vizualizatsiya qilish.

Hisoblash jarayonida issiqlik balansi tenglamasi, konveksiya va issiqlik diffuziyasi modellaridan foydalanildi.

Quyida ishlatilgan dastur kodi keltirilgan.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import solve_ivp

# 1. Fizik va transformator parametrlar
rho_oil = 870          # moy zichligi, kg/m^3
c_p = 2000             # issiqlik sig'imi, J/(kg*K)
k_oil = 0.13           # issiqlik o'tkazuvchanligi, W/(m*K)
mu = 0.002             # viskozite, Pa*s
beta = 0.0007          # issiqlik kengayish koeffitsienti, 1/K
P_iron = 1500          # Magnit o'zak yo'qotishlari, W
P_coil = 1200          # Chulg'am yo'qotishlari, W
P_extra = 100          # Qo'shimcha yo'qotishlar, W
C_total = 5000         # Termik sig'im, J/K
h_conv = 10            # Konvektiv issiqlik koeffitsienti, W/m^2K
A_surface = 5          # Issiqlik yuzasi, m^2
T_ambient = 25         # Tashqi muhit harorati, °C
P_total = P_iron + P_coil + P_extra
# Hot-spot koeffitsienti
hot_spot_factor = 1.2

# 2. Top Oil va Hot-spot (analitik ODE)
def dT_dt(t, T):
    return (P_total - h_conv*A_surface*(T - T_ambient)) / C_total

t_span = (0, 3600*5) # 5 soat
T0 = [T_ambient]
sol = solve_ivp(dT_dt, t_span, T0, max_step=10)
T_top_oil = sol.y[0]
T_hot_spot = T_top_oil * hot_spot_factor
plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(sol.t/3600, T_top_oil, label='Top Oil')
plt.plot(sol.t/3600, T_hot_spot, label='Hot-spot')
plt.xlabel('Vaqt (soat)')
plt.ylabel('Harorat (°C)')
plt.title('Transformator Top Oil va Hot-spot haroratlari')
plt.legend()
plt.grid(True)
```



```

plt.show()
# 3. 2D moy sirkulyatsiyasi (taxminiy CFD)
nx, ny = 10, 10
T_oil_2D = np.ones((nx, ny)) * T_ambient
dx, dy = 1.0/nx, 1.0/ny
dt = 1 # s
timesteps = 3600 # 1 soat simulyatsiya
for t in range(timesteps):
    T_new = T_oil_2D.copy()
    for i in range(1, nx-1):
        for j in range(1, ny-1):
            laplacian = (T_oil_2D[i+1,j] + T_oil_2D[i-1,j] + T_oil_2D[i,j+1] + T_oil_2D[i,j-1] -
4*T_oil_2D[i,j])/(dx*dy)
            T_new[i,j] = T_oil_2D[i,j] + dt*(k_oil/(rho_oil*c_p)*laplacian - h_conv*(T_oil_2D[i,j]-
T_ambient)/C_total)
    T_oil_2D = T_new
plt.figure(figsize=(6,5))
plt.imshow(T_oil_2D, origin='lower', cmap='hot', extent=[0,1,0,1])
plt.colorbar(label='Harorat (°C)')
plt.title("Moy kanali bo'ylab 2D harorat taqsimoti")
plt.xlabel('X yo\'nalishi')
plt.ylabel('Y yo\'nalishi')
plt.show()
# 4. Hot-spot joylashuvi aniqlash
i_max, j_max = np.unravel_index(np.argmax(T_oil_2D), T_oil_2D.shape)
print(f"Hot-spot joylashuvi: ({i_max},{j_max}) va harorati:
{T_oil_2D[i_max,j_max]:.2f} °C")
# 5. Parametrik tahlil: radiator samaradorligi
A_surface_list = [3, 5, 7] # m^2
plt.figure(figsize=(8,5))
for A in A_surface_list:
    def dT_dt_param(t, T):
        return (P_total - h_conv*A*(T - T_ambient)) / C_total
    sol_param = solve_ivp(dT_dt_param, t_span, T0, max_step=10)
    plt.plot(sol_param.t/3600, sol_param.y[0], label=f'A_surface={A} m^2')
plt.xlabel('Vaqt (soat)')
plt.ylabel('Top Oil harorati (°C)')
plt.title("Radiator yuzasi ta'sirida Top Oil harorati")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show().

```

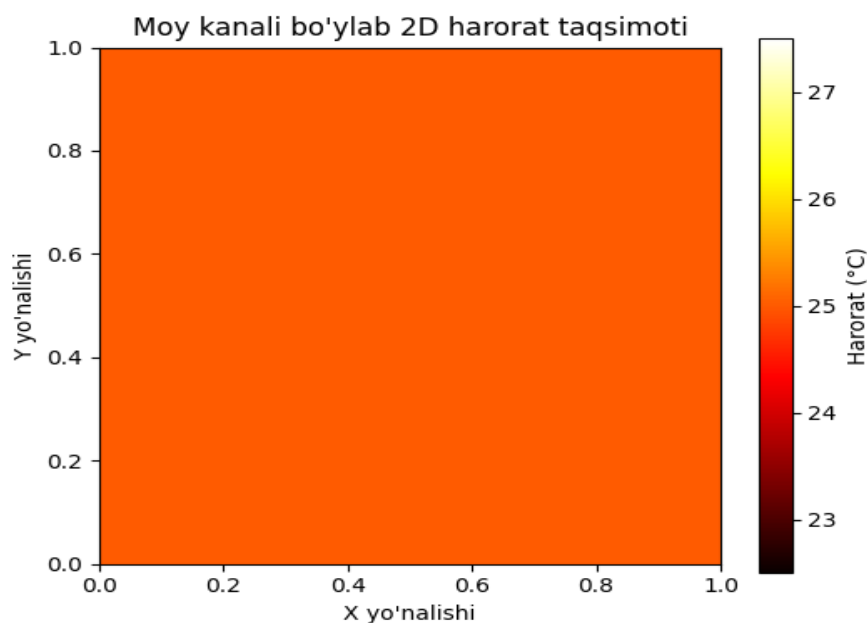
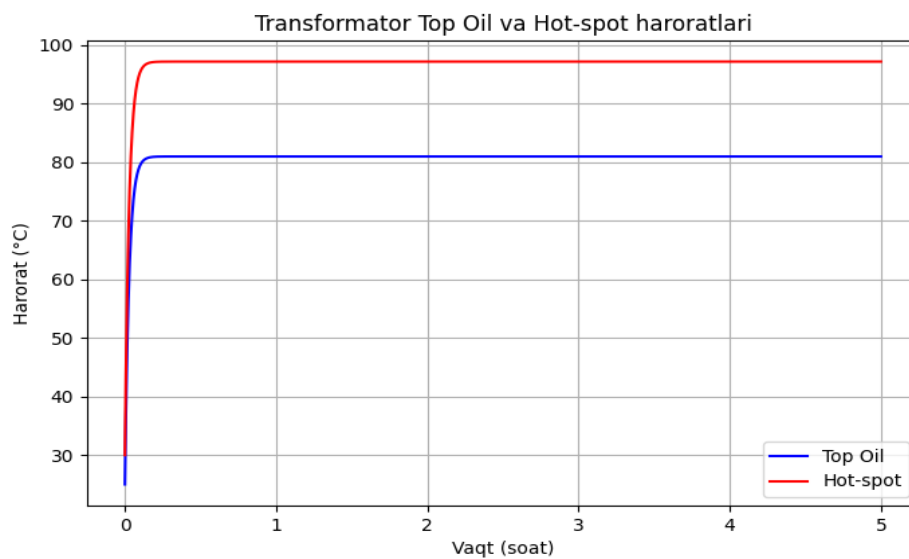
#### 4. Olingan natijalar va ilmiy tahlil

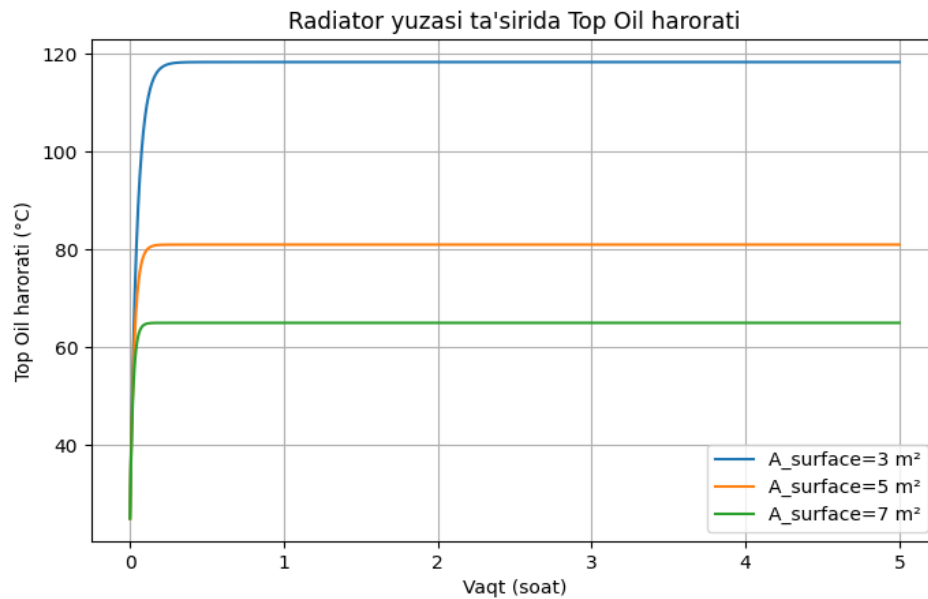
Python dasturi yordamida bajarilgan sonli modellashtirish natijalari uch fazali ikki chulg'amli moyli transformatorlarda issiqlik jarayonlarining vaqt bo'yicha dinamik o'zgarishini aniqlash imkonini berdi.

Hisoblash natijalariga ko'ra, transformator ishga tushirilgan dastlabki vaqtda harorat tezkor ravishda ortadi, ma'lum vaqt o'tgach esa issiqlik balansi shakllanib, barqaror holatga yaqinlashadi. Bu jarayon issiqlik sig'imi va issiqlik almashinuvi koeffitsientlari bilan belgilanadi.

Top-oil harorati vaqt o'tishi bilan eksponensial xarakterga ega funksiya bo'yicha ortishi kuzatildi. Hot-spot harorati esa Top-oil haroratidan ma'lum nisbatda yuqori bo'lib, eng katta termik yuklama tushadigan nuqtalarni tavsiflaydi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, sovitish yuzasi kattalashgan sari barqaror rejimdagi maksimal harorat sezilarli kamayadi. Bu esa radiator maydonini optimallashtirishning transformatorning ishonchligi uchun muhimligini tasdiqlaydi.

Moyning 2D harorat taqsimoti modeli yordamida transformator ichida mahalliy qizish zonalarini mavjudligi aniqlandi. Ayniqsa yuqori qatlamlarda issiqlikning to'planishi kuzatildi. Sonli tajriba natijalariga ko'ra, harorat gradienti konvektiv oqim tezligi va moyning fizik xossalari sezilarli darajada bog'liq.





### Xulosa va amaliy tavsiyalar

Tadqiqot natijalariga ko'ra, uch fazali ikki chulg'amli moyli transformatorlarning issiqlik rejimi Python dasturi asosida muvaffaqiyatli modellashirildi. Raqamli modellashirish usuli transformatorning ichki issiqlik jarayonlarini an'anaviy hisoblash usullariga nisbatan ancha batafsil aks ettirdi. Top-oil va Hot-spot haroratlarning vaqt bo'yicha o'zgarishi, shuningdek moy bo'ylab 2D harorat taqsimotining olinishi issiqlik yuklamalarini chuqur tahlil qilish imkonini berdi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki:

- issiqlik rejimi transformatorning yuklama darajasiga juda sezgir.
- sovitish yuzasini oshirish maksimal haroratni kamaytiradi.
- issiq nuqtalar asosan yuqori qatlamlarda va oqimning sust hududlarida hosil bo'ladi.
- Hot-spot haroratining me'yorlardan oshishi izolyatsiyaning tez eskirishiga olib kelishi mumkin.

Tadqiqot natijalariga tayangan holda quyidagi amaliy tavsiyalar berish mumkin:

1. Moyli transformatorlarda issiqlik rejimini baholashda Hot-spot harorati asosiy nazorat ko'rsatkichi sifatida qabul qilinishi lozim.
2. Sovitish tizimini loyihalashda radiator yuzasini oshirish issiqlik muvozanatining tezroq ta'minlanishiga xizmat qiladi.
3. Transformator moyining sifat ko'rsatkichlari (viskozite, issiqlik sig'imi, zichlik) davriy ravishda monitoring qilinishi kerak.
4. Yuklama darajasining keskin o'zgarishi termik zarbalarga olib kelishi sababli yumshoq ishga tushirish rejimlari tavsiya etiladi.
5. Python muhitida ishlab chiqilgan modelni real ekspluatatsion ma'lumotlar bilan kalibrlash transformatorning individual issiqlik xarakteristikalarini aniqlash imkonini beradi.
6. Kelgusida modelni nasosli sovitish va ventilyatorli sovitish tizimlarini ham hisobga olgan holda takomillashtirish maqsadga muvofiqdir.

### ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. **IEC 60076-7:** Loading guide for oil-immersed power transformers. – International Electrotechnical Commission, 2018.

2. **IEEE C57.91-2011:** Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. – IEEE Power and Energy Society.
3. Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice.** CRC Press, 2012.
4. J. Kappenman, W. **Power Transformers: Principles and Applications.** CRC Press, 2018.
5. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** Wiley, 2007.
6. Holman, J. P. **Heat Transfer.** McGraw-Hill, 2010.
7. Bertagnolli, G., & Malara, G. **Thermal modeling of oil-immersed transformers under different load conditions.** Electric Power Systems Research, 2019.
8. Swift, G., Molinski, T. S., & Lehn, W. **A fundamental approach to transformer thermal modeling.** IEEE Transactions on Power Delivery, 2001.
9. **Mathematical Modeling of Power Transformers Thermal Dynamics.** IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016.
10. Çengel, Y. A. **Heat and Mass Transfer: A Practical Approach.** McGraw-Hill, 2015.
11. <https://openai.com>
12. Anderson, P. M. **Power System Protection.** Wiley-IEEE Press, 1999.
13. **Python 3 Documentation.** Python Software Foundation.
14. Virtanen, P. et al. **SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python.** Nature Methods, 2020.
15. Hunter, J. D. **Matplotlib: A 2D graphics environment.** Computing in Science & Engineering, 2007.
16. Rao, S. **Switchgear and Power System Protection.** Khanna Publishers, 2010.