



Sirdaryo issiqlik elektr stansiyasidagi turbogeneratorning stator chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketishini hisoblashning matematik modeli

Nurali B. Pirmatov¹, Safar E. Shernazarov^{1a}, Farrux A. Akbarov^{1b}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1,a)} Assistant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; shernazarov6601@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0972-0744>

^{1,b} PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; farrux1927@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0045-9201>

Dolzarbli: hozirgi kunda amaldagi issiqlik elektr stansiyalarida katta quvvatli turbogenerator stator chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketish jarayonlari yuklamaning keskin oshib ketishi va chulg'ami sterjenlarning ichki qismlariga qurumlarni tiqilib qolishi hisobiga ko'zatilmoqda, bu esa ishlab chiqarilayotgan foydali aktiv quvvatni keskin kamayib ketishiga olib keladi. Shunday qilib, turbogenerator stator chulg'ami sterjenlarining lokal qizish jarayonida haroratning normal ish holatidan oshib ketishi bilan ko'zatiladi, bu esa izolyatsiya qatlamini tez eskirishiga, issiqlik deformatsiyalariga, qo'shimcha magnit va elektr isroflarni ortishiga olib keladi. Bu o'z navbatida turbogeneratorning ishlash muddatini qisqartirib, avariya holatiga olib keladi va energetika tizimining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shuning uchun stator chulg'amlaridagi qizish jarayonlarini aniq modellar asosida, chulg'amlarda keskin qizib ketuvchi issiqlik zonalarni oldindan aniqlash energetika uskunalari samarali ishlatish bugungi kunning eng muhim shartlaridan biridir. Yuqoridagi ma'lumatlarga asoslangan holda olib borilayotgan ilmiy tadqiqot ishida turbogeneratorlarda ishlab chiqarilayotgan aktiv quvvatlarni saqlab qolish chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketishini oldini olish orqali, samarali sovutishni tashkil qilish ishlab chiqarilayotgan aktiv quvvatni va turbogeneratorning ish samaradorligini oshirish bugungi kunda ancha dolzarb hisoblanadi. Hozirgi kunga kelib, Sirdaryo issiqlik elektr stansiyalaridagi quvvati 320 MW bo'lgan turbogenerator stator chulg'amlarini ichki qismlariga qurumlarni tiqilib qolishini oldini olish, uni keltirib chiqaruvchi omillarni chuqur tahlil qilish ulardagi bo'layotgan issiqlik jarayonlarni atroflicha o'rganib chiqishni talab qiladi. Ushbu maqolada turbogeneratorlarning stator chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketish jarayonlarini oldini olish, samarali sovutishni qo'llash va matematik modelini ishlab chiqish asosida, aktiv quvvatni oshirish masalalari ko'rib chiqilgan.

Maqsad: turbogenerator stator chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketish jarayonlarini matematik modelini, sovutish tizimini yaxshilash asosida ishlab chiqarilayotgan aktiv quvvatni oshirish va uzluksiz ishlashini ta'minlash.

Usullar: tadqiqot jarayonida turbogenerator stator chulg'ami sterjenlarini lokal qizib ketish jarayonlarini oldini olish, elektr energetika tizimlarini barqaror ishlashini ta'minlash, stator chulg'amlarini samarali sovutish usullarini qo'llash orqali energetika tizimi barqarorlashtirildi. Shuningdek, turbogenerator stator chulg'ami sterjenlariga qurumlarning tiqilish koeffitsienti inobatga olinib, lokal qizish jarayonlarini matematik masalalari samarali hal etish uchun matematik modellar ishlab chiqildi.

Natijalar: issiqlik elektr stansiyalaridagi turbogenerator stator chulg'amlarini lokal qizish jarayonlarini matematik modellashirish asosida, samarali sovutish tizimini qo'llash o'rganib chiqildi. Natijada ishlab chiqarilayotgan aktiv quvvat oshadi va ishlash davomiyligini oshirishga erishiladi.

Kalit so'zlar: Turbogenerator, stator chulg'ami sterjenlari, issiqlik jarayoni, hisoblash modeli, tiqilish koeffitsienti.

For citation: Pirmatov N.B., Shernazarov S.E. Akbarov F.A. Mathematical model for calculating local overheating of stator winding rods of a turbogenerator at the Syrdarya thermal power plant. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources, 2026, no. 2, pp. 75-83.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21200395>

Received: 14.12.2025

Revised: 17.04.2026

Accepted: 10.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: Copyright: © Nurali B. Pirmatov, Safar E. Shernazarov, Farrux A. Akbarov, 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/>).BY).

Математическая модель расчета локального нагрева стержней обмотки статора турбогенера- тора Сырдарьинской ТЭС

Нурали Б. Пирматов¹, Сафар Э. Шерназаров^{1a}, Фаррух А. Акбаров^{1b}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1,a)} Ассистент, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; shernazarov6601@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0972-0744>

^{1,b} PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; farrux1927@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0045-9201>

Актуальность: в настоящее время на действующих тепловых электростанциях наблюдается локальный перегрев обмоток статора турбогенераторов большой мощности из-за резкого увеличения нагрузки и засорения внутренних частей обмоток сажей, что приводит к резкому снижению вырабатываемой полезной активной мощности. Так, в процессе локального перегрева обмоток статора турбогенератора температура превышает нормальное рабочее состояние, что приводит к быстрому износу изоляционного слоя, термическим деформациям и увеличению дополнительных магнитных и электрических потерь. Это, в свою очередь, сокращает срок службы турбогенератора, приводит к аварии и может негативно сказаться на технико-

экономических показателях энергосистемы. Поэтому точное моделирование процессов нагрева в обмотках статора и раннее обнаружение зон перегрева в обмотках является одним из важнейших условий эффективного использования энергооборудования сегодня. На основе вышеизложенной информации проводится научно-исследовательская работа по предотвращению локального перегрева обмоток статора турбогенераторов, увеличению вырабатываемой ими активной мощности, организации эффективного охлаждения, повышению вырабатываемой активной мощности и КПД турбогенератора. На сегодняшний день предотвращение засорения внутренних частей обмоток статора турбогенератора мощностью 320 МВт на Сырдарьинской тепловой электростанции, тщательный анализ факторов, вызывающих это явление, требуют детального изучения тепловых процессов, происходящих в них. В данной статье рассматриваются вопросы предотвращения локального перегрева обмоток статора турбогенераторов, использования эффективного охлаждения и разработки математической модели, а также увеличения активной мощности.

Цель: для увеличения вырабатываемой активной мощности и обеспечения бесперебойной работы используется математическая модель процессов локального перегрева обмоток статора турбогенератора и усовершенствованная система охлаждения.

Методы: в ходе исследования была стабилизирована энергетическая система путем предотвращения локального перегрева обмоток статора турбогенератора, обеспечения стабильной работы энергосистемы и применения эффективных методов охлаждения обмоток статора. Также были разработаны математические модели для эффективного решения математических задач процессов локального перегрева с учетом коэффициента трения обмоток статора турбогенератора.

Результаты: на основе математического моделирования локальных процессов нагрева обмоток статора турбогенератора на тепловых электростанциях было изучено применение эффективной системы охлаждения. В результате увеличивается вырабатываемая активная мощность и продолжительность работы.

Ключевые слова: турбогенератор, обмотки статора, тепловой процесс, вычислительная модель, коэффициент перегрузки.

Mathematical Model for Calculating Local Overheating of Stator Winding Bars in Syrdarya TPP Turbogenerators

Nurali B. Pirmatov¹, Safar E. Shernazarov^{1,a}, Farrux A. Akbarov^{1,b}

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1,a)} Assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; shernazarov6601@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0972-0744>

^{1,b} PhD, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; farrux1927@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0045-9201>

Relevance: currently, in operating thermal power plants, local overheating of the stator windings of large-capacity turbogenerators is observed due to a sharp increase in the load and clogging of the internal parts of the windings with soot, which leads to a sharp decrease in the useful active power generated. Thus, during the process of local overheating of the stator windings of a turbogenerator, the temperature exceeds the normal operating state, which leads to rapid wear of the insulation layer, thermal deformations, and an increase in additional magnetic and electrical losses. This, in turn, reduces the service life of the turbogenerator, leads to an accident, and can negatively affect the technical and economic performance of the power system. Therefore, the accurate modeling of the heating processes in the stator windings and the early detection of hot zones in the windings is one of the most important conditions for the effective use of power equipment today. Based on the above information, the scientific research work is carried out to prevent local overheating of the stator windings of turbogenerators, to increase the active power generated by them, to organize effective cooling, to increase the active power generated and the efficiency of the turbogenerator. To date, to prevent the clogging of the internal parts of the stator windings of the 320 MW turbogenerator at the Syrdarya thermal power plant, to thoroughly analyze the factors causing it, requires a detailed study of the thermal processes occurring in them. This article considers the issues of preventing local overheating of the stator windings of turbogenerators, using effective cooling and developing a mathematical model, and to increase the active power.

Aim: to increase the active power generated and ensure uninterrupted operation based on the mathematical model of local overheating processes of turbogenerator stator winding rods and improving the cooling system.

Methods: during the research, methods for preventing local overheating of turbogenerator stator bars were developed, stable operation of the electric power system was ensured, and effective cooling techniques for stator windings were applied. In addition, considering the clogging coefficient of the internal channels of the stator bars, algorithms adapted to the mathematical model were developed to effectively solve the problems of local overheating.

Results: based on mathematical modeling of local heating processes of turbogenerator stator coils in thermal power plants, the use of an effective cooling system was studied. As a result, the active power generated increases and the duration of operation is increased.

Key words: turbogenerator, stator winding rods, thermal process, computational model, congestion coefficient.

1. Kirish (Introduction)

Bugungi kunda mamlakatimiz iqtisodiyotining strategik muhim sohalaridan biri bo'lgan energetika sohasini barqaror rivojlanishi sanoat korxonalari va aholi sonining oshib ketishi bilan birga keladi. Shunday ekan, amaldagi Sirdaryo issiqlik elektr stansiyasidagi gigant energobloklarining quvvati 320 MW bo'lgan turbogenerator stator chulg'am sterjenlarini yuklanish hisobiga qizish jarayonlarini asosan yozning issiq kunlarida havoning harorati 40 °C dan oshganda yoki ichi bo'sh kanalchalaridan distillangan suv oqib o'tadigan kanalchalarini ba'zi birlari qisman yopilib qolishi natejasida lokal qizish jarayolari yuzaga keladi va bu turbogenerator uchun xavfli omil hisoblanadi. Bu holat stator chulg'amlarida ko'pincha quyidagi sabablarga ko'ra yuzaga keladi: suv kanalchalarida qurumlarning haddan tashqari oshib ketishi, vodorodning distirlangan suv tomonga o'tishi natejasida hosil bo'ladi. Bu holatda o'tkazgichlarda qurumlar to'planib tiqilib qolishi ularning ruxsat etilgan temperaturadan oshib ketishiga olib keladi, bu esa ularning xizmat muddatini qisqarishiga sababchi bo'ladi. Katta quvvati turbogenerator stator pazlaridagi chulg'am sterjenlari ikki qatlamli bo'lganda ularga qurimlarning tiqilishi natijasida, ularning harorati ruxsat etilgan haroratdan 3-3,5 marta yuqori bo'lishi ulardagi izolyasiyaning tez eskirishiga va ishlab chiqarish sarfini va samarali ishlash muddatini keskin pasayishiga olib keladi.

Shunday qilib, turbogeneratorlarni ishlatish jarayonida yuzaga keluvchi mexanik to'siqlar, mis o'tkazgichlarni korroziyaga uchrashi bilan gidravlik shoxobchalarning bloklanishi yuzaga keladi. Bu holatda ularni qo'yidagicha tahlil qilamiz, agar ichki yuzasi bo'sh bo'lgan o'tkazgichlarni simmetrik oksidlanish qatlami bilan qoplangan bo'lsa, ularning kimyoviy tarkibi distirlangan suvning oksidlanish qaytarilish xossalari bilan aniqlanadi [1-4]. Agar distirlangan suvda kislorod konsentratsiyasi 0.05 mg /dm³ dan kichik bo'lsa sirtqi himoya plyonkasi mis cho'kindilaridan iborat bo'ladi, agar kislorodning distillyatdagi konsentratsiyasi 0.5 mg/dm³ dan katta bo'lsa sirtqi himoya plyonkasi asosan misning yarim oksidlaridan iborat bo'ladi.

Ushbu holat ko'zatiladigan bo'lsa, turbogenerator stator chulg'am sterjenlari ichi g'ovak turubkachalaridan oqib o'tayotgan distirlangan suvning qizish jarayoni kuchli ishqoriy muhitda bo'lganda kislorodning yuqori konsentratsiyasiga qarab ikkita korroziyalanish hududlariga ajraladi: misning kuchaygan zanglash va oksidli plyonkaning ko'chsiz hududlari joylashishi [9,12]. Stator chulg'am o'tkazgichlarida qurimlarning yig'ilib tiqilib qolishini oldini olish uchun sovutgich qurilmasidan oqib o'tib filtirlash jarayoniga o'tishda ularga katta ahamiyat berishimiz, suv sifatini o'zluksiz nazorat qilib borish, generatorni o'ta yuklama holatida ishlaganda kislorodning distirlangan suvdagi miqdori 0,05-2 mg/dm³ dan oshib ketmasligini oldini olish zarur, aks holda chulg'am sterjenlarida o'ta qizish hosil bo'lib generator to'liq ish holatidan to'xtatilishiga olib keladi.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Turbogeneratorning stator chulg'amning sterjenlarini lokal qizishi jarayonlarini oldini olish effektiv sovutish usullarini qo'llash orqali ishlab chiqarish samaradorligini oshirish tizim barqarorligini ta'minlash, bugungi kunda yirik sanoat korxonalari, istemolchilarning elektr energiyasiga bo'lgan talabi kun sayin oshib borayotgan bir paytgga kelib, amaldagi Sirdaryo issiqlik elektr stansiyasidagi turbogeneratorlarda ishlab chiqarayotgan aktiv quvvatni oshirish bilan stator chulg'amlarida qizish jarayonlari kelib chiqadi. Bu holatda stator chulg'am sterjenlarini sovutish tizimini optemal boshqarish ularni matematik tahlil qilish, qizish jarayonlarini o'rganish uchun Pausson tenglamasi asosida o'tkazgich materialaridan o'tayotgan issiqlik o'tkazuvchanlikni parallelepiped shaklidagi tugunlar va elementlar uchun, issiqlik o'tkazuvchanligi tenglamalari dekart koordinatalarida quyidagicha ifodalanadi:

$$c(\theta, x, y) \rho(\theta, x, y, z) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(\theta, x) \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(\theta, y) \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(\theta, z) \frac{\partial \theta}{\partial z}) + q_v(\theta, x, y, z). \quad (1)$$

Silindrsimon koordinatalarda silindr shaklga ega bo'lgan tugunlar va elementlardagi harorat maydonini tavsiflash uchun Puassoning issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamalari quyidagi shaklga ega:

$$c(\theta, r, \varphi, z) \rho(\theta, r, \varphi, z) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_r(\theta, r) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \right) + \lambda_\varphi(\theta, \varphi) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \lambda_z(\theta, z) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + q_v(\theta, r, \varphi, z); \quad (2)$$

stasionar rejimda uch o'lchovli koordinatalar tizimida $\frac{\partial}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ tenglama (1) va (2) tenglamalarga bir biri bilan tenglashtirilganda tegishli elliptik shaklga keltiriladi:

$$\lambda_x(\theta, x, y) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y(\theta, x, y) \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + q_v(\theta, x, y) = 0; \quad (3)$$

$$\lambda_r(\theta, r) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \lambda_\varphi(\theta, \varphi) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + q_v(\theta, r, \varphi) = 0; \quad (4)$$

bu yerda, θ - tahlil qilingan hududdagi harorat; Q_i -mos keladigan i-kanaldagi sovutgichdan oqimi; F_i , b_i - sovutish kanalining kesim yuzasi va kengligi i- kengligiga mos ravishda sovutish kanali; l -mos keladigan fazoviy koordinata; α_{xi} , c_{xi} - issiqlik uzatish koeffitsiyenti o'ziga xos va mos ravishda sovutgichning issiqlik sig'imi; c , ρ , l - solishtirma issiqlik sig'imi, zichligi va issiqlik o'tkazuvchanligini tahlil qilish sohasi.

Chegara shartlarini quyidagi shaklda yozamiz: $\theta_{xi} = \pm \frac{\lambda_M}{\alpha_{xi}} \frac{\partial \theta}{\partial l_i}$ - sovutish kanallarining ichi bo'sh o'tkazgichlari; $\theta_{xi} = \pm \frac{\lambda_a}{\alpha_{xi}} \frac{\partial \theta}{\partial l_i}$ stator tashqi issiqlik almashinuvi old qismi yuzalari va statorning po'lat uzagi paketlari:

$$\pm \lambda_i \frac{\partial \theta_i}{\partial n} (\xi - 0) = \Lambda_k [\theta_i (\xi + 0) - \theta_j (\xi - 0)] \text{ Ba } \Lambda_k [\theta_i (\xi + 0) - \theta_j (\xi - 0)] = \pm \lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial n} (\xi + 0). \quad (5)$$

(5) formulada chulg'am yuzalarining aloqa chegarasi elementlarining yoyilmasi keltirilgan. Bu formulaga asosan qizish jarayonlarini deferensial tenglamasi chiziqli bog'lanmaganligi uchun chulg'amlarni qizish jarayonlarini o'rganishda issiqlik o'tkazuvchanligi, zichlik, issiqlik sig'imi va o'tkazgichning qarshilik koeffitsiyenti haroratga nohiziqli bog'langanligi hisobga olinadi.

Bu masalani yechishda birinchi qadam sifatida boshlang'ich differensial tenglamalarni diskretizatsiya(analog signallarni raqamli shaklga aylantirish) ishlarini oshiriladi, buning natijasida nohiziqli algebrik tenglamalar sistemasi (nohiziqli farqlar sxemasi) olinadi. Keyinchalik haroratga qarab, belgilangan termofizik parametrlarni bo'lak-bo'laklarga ajratib chiziqli va o'rtacha qiymatlarni olish ishlari amalga oshiriladi. Bunda ko'rib chiqilayotgan maydonning muhiti bir xil emas (mis chulg'ami va izolyatsiya), bu holatda mis chulg'am materiali va ularning izolyatsiyasi turli issiqlik chegarasida bo'lganda ularning texnik parametrlarida uzilishli funksiyalar bo'ladi. Shuning uchun, ushbu chegaraviy masalani yechish uchun metod talab qilinadi, u yordamida uzilishli koeffitsiyentlar mavjud bo'lsa ham, konvertent bo'lgan sxemalarni olish mumkin. Bunday sinfdagi masalalarni yechishda samarali metod bo'lib, integratsiya-interpolatsiya metodi (balans metodi) hisoblanadi[16].

Masalaning aprobatitsiyasi ikki bosqichda amalga oshiriladi: birinchi navbatda fazoviy o'zgaruvchilar keyingisi vaqt bo'yicha. Fazoviy o'zgaruvchilar bo'yicha, ko'rib chiqilayotgan hududdagi tugunlar va elementlar N - miqdordagi elementar hajmlarga bo'linadi. Issiqlik almashinuvi masalasining farq sxemasini qurish natijasida, integratsiya-interpolatsiya metodi yordamida har bir elementar hajm uchun issiqlik balansining tenglamasini quyidagi tarzda ifodalash mumkin:

$$c_n \rho_n V_n \frac{\partial \theta}{\partial t} = (\theta_{n+1} - \theta_n) \Lambda_{n+1,n} + (\theta_{n-1} - \theta_n) \Lambda_{n-1,n} + \dots + q_n \cdot V_n, n = 1, 2, \dots, N; \quad (6)$$

bu yerda, $\Lambda_{n\pm j,n}$ -qo'shni elementar hajm (tugun)ga nisbatan issiqlik o'tkazuvchanligi.

Yuqoridagi (6) formulada, vaqt bo'yicha differensial tenglama va fazoviy koordinatalar bo'yicha farq tenglamasi olinadi. O'ng tomonda uzluksiz komponentlar (issiqlik oqimlari) mavjud, ularda issiqlik oqim parametrlarining uzilish nuqtalari (chiziqlari)da ochiq ko'rinishdagilari yo'q. Ushbu holatni barcha tugunlarda bir xil formulalarda yozish imkonini beradi (uzilishlar atrofida formulalarni o'zgartirishsiz). Shunday qilib, integratsiya-interpolatsiya metodi yordamida sovutish kanallarida sovutuvchi suvning qizishi va sovushi hududlarida olinadi[13,16]. Keyinchalik, vaqt bo'yicha hosilalarni farqni o'zgarishini ko'rib chiqamiz. Shunday qilib vaqtning keyingi momentida n -tugundagi haroratni aniqlash uchun t_{j+1} hisoblash formulalari quyidagi shaklga ega:

$$\theta_n^{j+1} = \frac{(\sum \theta_i \Lambda_{i\pm 1,n} + q_n^j \vartheta_n + \theta_n^j (F_{On} - \sum_{i=1}^6 \Lambda_{n\pm 1,n}))}{F_{On}}. \quad (7)$$

Bunda yerda, $F_{On} = \frac{V_n c_n \gamma_n}{t_j}$ quydagiga teng, agar quyidagi shart bajarilsa:

$$F_{On} - \sum_{i=1}^6 \Lambda_{n\pm 1,n} \geq 0.$$

Har bir vaqt oralig'ida hisoblashni bir necha marotaba takrorlash, misning issiqlik almashinuvi parametrlari qiymati va mis chulg'amdagi qizish hisobiga hosil bo'lgan ortiqcha qizishlarni aniqlaydi va ulardagi temperaturaga bog'liq funktsiya sifatida quyidagi munosabatlarni keltirib chiqaradi:

$$\lambda_{cu} = 400 \cdot (1 - 1,8 \cdot 10^{-4} \theta) \frac{W}{m \cdot K}; \quad (8)$$

$$C_{cu} = 389 \cdot (1 + 1,7 \cdot 10^{-2} \theta + 0,6 \cdot 10^{-6} \theta^2) \frac{J}{kg \cdot K}; \quad (9)$$

$$0 \leq \theta \leq 500 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$C_{cu} = 389 \cdot 1,235 \cdot (1 + 1,8 \cdot 10^{-4}(\theta - 500)) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}};$$

$$\theta > 500 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\rho_{cu} = \frac{8800}{(1 + \alpha_{tr})^5}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad (11)$$

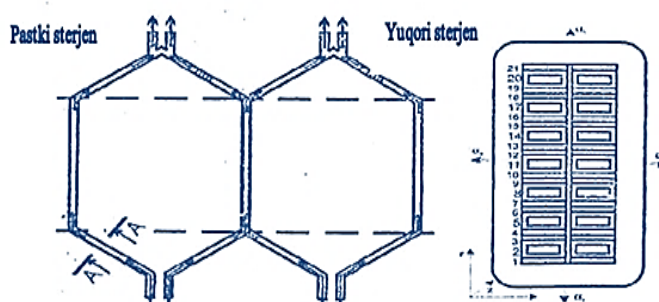
bu yerda, α_{tr} - chiziqli kengayish koeffitsienti:

$$\alpha_{tr} = 1,67 \cdot 10^{-6} + 3,8 \cdot 10^{-9}\theta + 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot \theta^2 \text{ K}^{-1}; \quad (12)$$

$$\gamma_{cu} = 1,68 \cdot 10^{-8}(1 + 4,33 \cdot 10^{-3}\theta + 4,53 \cdot 10^{-7}\theta^2) (\text{OM} \cdot \text{M}^2)/\text{M}. \quad (13)$$

Vaqt o'tishi, bilan tokning bosqichma-bosqich $t=T_1$, vaqt oralig'ida o'zgarishi:

$$\rho = I^2 \frac{\gamma_{cu} \cdot l}{s}. \quad (14)$$



1-rasm. TVV-320-2U3 seriali turbogenerator stator chulg'ami sterjenlarining uch o'lchovli koordinatalar sestimasidagi hisoblash modeli [16]

Fig.1. Computational model of the stator winding rods of the TVV-320-2U3 series turbogenerator in a three-dimensional coordinate system [16]

O'tkazilgan matematik tahlilda statorning pazida joylashgan mis chulg'am sterjenlari haroratlarini kam miqdorda sovutilayotganligini anglatadi, bu ko'rsatgich mis chulg'am sterjenlaridagi qizish jarayonlarini tahlil qilishda sovutish parametrlariga unchalik katta ta'sir qilmaydi, asosan maksimal haroratda chulg'am sterjenlarini aynan pazdan tashqari old qismida lokal qizish juda yuqori ekanligini ko'rsatadi.

Bundan tashqari turbogeneratorning yordamchi issiqlik nazorat vosita(qarshilik termometr)larini ishlatish stator chulg'am sterjenlarida hosil bo'lgan umumiy lokal qizish jarayonlarini baholashda muhim o'rin tutadi. Ushbu o'lchov vositalari odatda yuqori sterjenlarda pona(klin)ning pastki qismida izolyatsiyasi yuzasiga yaqin joyga joylashtiriladi. Ularning soni chegaralanganligi sababli, ular butun yuzaga teng taqsimlanadi va ularda chulg'amning asosan yuza qismidagi o'rtacha haroratlarini qayd etadi. Natijada, sterjen ichi g'ovak qismlarida yuzaga keladigan lokal qizish joylarini aniqlash imkoniyati cheklanadi. Bundan tashqari, chulg'amlarni lokal qizish darajasi turbogeneratorning ish rejimi o'zgarishiga bog'liq holda vaqt davomida o'zgarib turadi [5-7, 12].

3. Natijalar (Results)

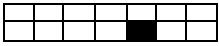
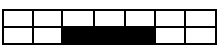
Tadqiqot natijasi asosida o'lchangan 2-jadvaldagi qiymatlardan ko'rinib turibdiki, chulg'am sterjenlarining ichi bo'sh g'ovak kanalchalariga tiqilish koeffitsiyenti 0,397 bo'lganda, chulg'am sterjenidagi maksimal harorat ruxsat etilgan maksimal (75 °C) haroratga teng bo'ladi, va shu bilan birga unga mos ravishda qarshilik termometri ko'rsatkichi 44,7 °C ga teng. Chulg'am sterjenlari ichi bo'sh kanallariga qisman tiqilish koeffitsienti oshgani sari, chulg'am o'tkazgichlarining harorati maksimal haroratdan sezilarli darajada oshirishga intiladi, lekin qarshilik termometrlarining ko'rsatkichlari ruxsat etilgan qiymat (75 °C) dan kam bo'ladi. Masalan, chulg'am sterjenlarining ichi bo'sh kanallariga qisman tiqilish koeffitsientlari bo'lganda, chulg'am sterjenining harorati 126,7 °C ga yetadi, termometr ko'rsatkichi esa 50,2 °C bo'ladi; to'liq tiqilish holatida chulg'am sterjenlarining harorati 129,8 °C ga yetadi, va shu vaqt orlig'ida termometr ko'rsatkichi esa 54,3 °C ga yetadi [14,17].

Ushbu olib borilgan tadqiqot ishi 2- jadvaldagi ma'lumotlari asosida qisman tiqilib qolish koeffitsientini oshishi bilan chulg'am sterjenlarida harorat keskin oshadi va bunda qarshilik termometri

ko'rsatkichlari esa ruxsat etilgan chegaralardan oshmaganligini ko'rishimiz mumkin. Shunday qilib, 2 - rasmga binoan qisman tiqilib qolish koeffitsientining $k_{qurum} = 0,397$ ga teng bo'lganda, harorati 75°C ga etadi va bu holatda qarshilik termometrining ko'rsatkchlari va undan oqib o'tayotgan suv harorati $44,7^{\circ}\text{C}$ ga yetayotganligini bunda chulg'am ichi g'ovak kanalarining qisman tiqilib qolishi bilan uning harorati chulg'am sterjenlari toza bo'lganga qaraganda 2,5 barobar yuqori haroratga, qarshilik termometrining ko'rsatkichi esa $12,5^{\circ}\text{C}$ ga oshadi [13-14].

1-jadval. Stator chulg'am sterjenlarining ichi bo'sh o'tkazgichlarini to'lib tiqilib qolishi natejasida issiqlik parametrlari matematik modellardagi ta'sirini o'rganish

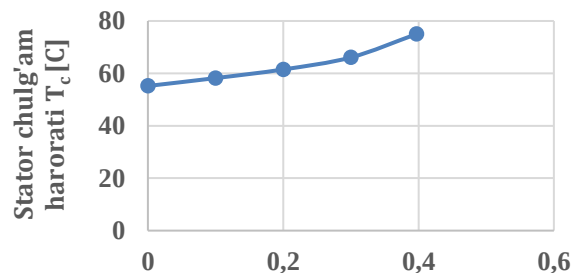
Table 1. Study of the effect of thermal parameters in mathematical models due to the clogging of the hollow conductors of the stator winding rods

Ichi bo'sh sterjen kanalariga tiqilish modellari	Tiqlib qolgan o'tkazgichlar miqdori		Yuqori sterjen			Pastki sterjen		
	1-qator	2-qator	Sterjendan chiqish joyidagi distillyatning harorati $^{\circ}\text{C}$	Sterjen ichidagi distillyatning qizish harorati $^{\circ}\text{C}$	Distillyatning eng yuqori harorati $^{\circ}\text{C}$	Sterjendan chiqish joyidagi distillyatning harorati $^{\circ}\text{C}$	Sterjen ichidagi distillyatning qizish harorati $^{\circ}\text{C}$	Distillyatning eng yuqori harorati $^{\circ}\text{C}$
Normal ish holati	0	0	53,6	32,2	63,5	38,5	18,4	40,2
	1	0	59,8	35,6	162,4	43,4	20,6	75,3
	2	0	65,3	40,3	340,5	45,3	22,6	145,7
	3	0	74,2	53,5	980,5	47,6	25,3	250,4
	2	2	67,8	50,4	195,8	50,3	27,5	101,3
	3	3	80,6	65,6	210,6	60,3	36,2	105,9

2-jadval. Yuqori sterjenning maksimal harorati va qarshilik termometrining ko'rsatkichlari ostida ichi bo'sh o'tkazgichning tiqilib qolish darajasiga qarab pona (klin)ning joylashishi

Table 2. The location of the wedge depending on the maximum temperature of the upper rod and the degree of blockage of the hollow conductor under the resistance thermometer readings

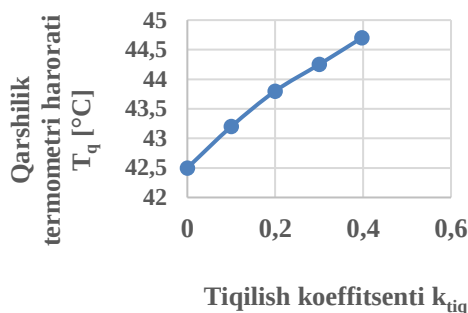
No	Tiqilish koeffitsientini nisbiy birliklar tizimidagi qiymati $k_{mu} = \frac{S_{mu}}{S_{nom}}$	Yuqori sterjendagi harorat, $^{\circ}\text{C}$	Yuqori sterjendagi qarshilik termometrining qizish harorati, $^{\circ}\text{C}$
1	0	55,2	42,5
2	0.1	58,2	43,2
3	0.2	61,5	43,8
4	0.3	66,1	44,2
5	0.397	75	44,7



Tiqilish koeffitsenti k_{tiq}

2-rasm. Yuqori chulg'am sterjenlarining maksimal haroratini tiqilib qolish koeffitsientiga bog'liq o'zgarish grafigi

Fig 2. Graph of the maximum temperature of the upper coil rods as a function of the clogging coefficient



3-rasm. Qarshilik termometri haroratini tiqilish koeffitsentiga bog'liq o'zgarish grafigi
Fig. 3. Graph of resistance thermometer temperature versus congestion coefficient

Yuqoridagi, 3-rasmga movofiq, turbogeneratorlarni ishga tushirish jarayonida yuklamaning boshlang'ich nol qiymatdan nominal qiymatgacha o'zgarishida qarshilik termometri haroratini tiqilish koeffitsentiga bog'liqlik grafigi keltirilgan bo'lib, bunda stator chulg'am sterjenlari pazda pona(klin)-ning ostida o'rnatilgan qarshilik termometrlarini qizish haroratini tiqilib qolish koeffitsiyentiga bog'liqlik grafiklari, 2-jadvaldagi ma'lumotlar asosida o'rganib chiqildi.

Olingan tahliliy ma'lumotlar asosida issiqlik elektr stansiyalardagi turbogeneratorlarni turli ish rejimlarida bo'lganda, ayniqsa ortiqcha yuklanish hisobiga hosil bo'lgan lokal qizish, chulg'am ichki qismi kanalchalariga qurimlarning qisman tiqilib qolganda ortiqcha qizish hisobiga elektr isroflarini oldini olish uchun qarshilik termometrlaridagi haroratlar doimiy nazorat qilinadi.

4. Munozara (Discussion)

Shunday qilib, turbogenerator statot chulg'am sterjenlari qisman yoki to'liq tiqilish holatida bo'lganda, sterjenlarning harorati ruxsat etilgan maksimal haroratdan oshsa, ko'pchilik holatlarda qarshilik termometrlarining ko'rsatkichlari ruxsat etilgan harorat 75 °C dan kam bo'lishi kerak.

Ma'lumki, harorat har 10-20 °C ga ko'tarilganda, izolyasiyaning xizmat qilish muddati ikki barobar qisqaradi. Bunday nuqsonlarning mavjudligi izolyasiyaning tezroq eskirishiga, uning shikastlanishiga va jiddiy avariya olib kelishi mumkin [8-11,14].

O'tkazilgan tajriba ma'lumotlari tahlili shuni ko'rsatadiki, turbogeneratorning stator chulg'ami sterjenlaridagi lokal qizish jarayonlarini doimiy nazorat qilib turish zarurligini tasdiqlaydi.

Turbogeneratorlarni ishlatish odatda, domiy va barqaror ish rejimida bo'lganda amalga oshiriladi. Bunday ish sharoitida stator chulg'aming yuqori sterjenlarida ko'zatiladigan harorat ko'rsatkichlarini, ushbu sterjenlar yaqinida joylashtirilgan qarshilik termometrining o'lchov natijalari bilan taqqoslashda muhim diagnostik ahamiyatga ega. Mazkur taqqoslash usuli chulg'am sterjenlarida lokal qizish jarayonlarini kelib chiqishini oldindan aniqlash imkonini beradi. Natijada turbogeneratorning ishonchli eksploatatsiyasi uchun xavf tug'diruvchi potensial nuqsonlarni o'z vaqtida aniqlab, ularni oldini olishga imkoniyat yaratadi [17-19].

Shu tariqa harorat monitoringi va diagnostik tahlilning integrallashgan holatda qo'llanilishi turbogenerator stator chulg'aming texnik holatini baholashda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi hamda ekspluatatsiya xavfsizligini oshirishga xizmat qiladi.

5. Xulosa (Conclusion)

1. Turbogenerator stator chulg'am sterjenlarining lokal qizish jarayonlari asosan ichi g'ovak kanalchalarga qurumlarning tiqilib qolishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi.

2. Ishlab chiqilgan matematik model asosida issiqlik maydonini aniqlash lokal qizish (xavfli qizish) zonalarini oldindan baholash imkoniyatini yaratildi.

3. Katta quvvatli turbogeneratorlarning stator chulg'am sterjenlarini turli yuklama oralig'ida bo'lganda ish rejimlarini o'zganishi bilan sterjenning uzunligi bo'yicha qizish jarayonlarini undan oqib o'tuvchi suvning qizishini mis o'tkazgichning C_{cu} , ρ_{cu} , va λ_{cu} haroratga bog'liqligini xususiyatlarini hisobga olindi.

4. Stator chulg'am sterjenlarining qizish harorati va unga mos qarshilik termometrlarining ko'rsatkichlari aniqlandi.

ADABIYOT

1. Копылов И.П. Электрические машины. - М: Высшая школа. 2004.- 360 с.
2. ПАО «ЕЭС России». Методические указания по использованию экспертной системы оценки эксплуатационно-ремонтного обслуживания турбогенераторов. РД 153-34.1-30.608-2000.

3. С.Е. Соколов, Ю.Г. Черемисинов Эксплуатация, ремонт и испытание электрооборудования собственных нужд и вторичных устройств электрических станций. – Алматы: АИЭС, 2005. – 85с.
4. Мамиконянц Л.Г., Самородов Ю.Н., Шейко П.А. и др. Методы и результаты обследований длительно работающих турбо- и гидрогенераторов электростанций России; критерии для оценки возможности продления сроков их эксплуатации. Тезисы докладов открытой научно-практической конференции «Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем. Определение перспектив надежности работы ЕЭС России». М.: ЭНАС, 1999.
5. Кулаковский В.Б., Самородов Ю.Н., Ханакон А.С. О предельном состоянии обмоток статоров турбогенераторов с микалентной компаундированной изоляцией. «Электрические станции», 1996, № 9.
6. Бутов А.В., Каплин В.Н., Крылов М.П., Пикульский В.А. Использование современных методов диагностики сердечников статоров при проведении ремонтов турбогенераторов. «Электрические станции», 2000. № 11.
7. Самородов Ю.Н. Определение причин неисправностей обмоток статоров и роторов турбогенераторов. 2-ая специализированная школа-семинар, М., 2001.
8. Бережанский В.Б., Моисеев А.В., Ростик Г.В. Способ контроля замыкания листов активной стали сердечников электрических машин и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2082274, кл. H02K 15/00, G01R 31/34, 1994.
9. Объемы и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.700-97, М., ЭНАС, 1998.
10. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. М., ЭНАС, 1997.
11. Маслов В.В. Измерение частичных разрядов для диагностики изоляции обмоток статоров. Вестник ВНИИЭ, М., 1998.
12. Edmonds J. S., Daneshpooy A., et al. Turbogenerator stator core study: Localized heating caused by damage in laminations // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – Vol. 58, Iss. 2. – Pp. 1845–1853. – DOI: 10.1109/TIA.2021.3133541.
13. Zhang G., Liang Y., Liu H., et al. Calculation and analysis of temperature field in stator winding of large turbogenerator // Energies. – 2019. – Vol. 12, Iss. 7. – Article 1234. – DOI: 10.3390/en12071234.
14. Hu P., Sun Y., Li W., et al. Numerical simulation and experimental research of the stator temperature field of a 300 MW turbogenerator // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 105. – Pp. 381–389. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.
15. Wang L., Wang Y., Zhang Z., et al. Impact of cooling duct blockage on the temperature distribution of stator winding in turbogenerators // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 58123–58131. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2981245.
16. Li W., Li J., Zhao Y., et al. Thermal analysis of large turbogenerator stator winding based on subdomain finite element method // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2016. – Vol. 31, Iss. 1. – Pp. 156–164. – DOI: 10.1109/TEC.2015.2456041.
17. Isakhodjayev, Kh., Shernazarov, S., Yakubova, D. Analysis of the method for cooling stator wires of the standard of high power turbo generators at thermal power plants *AIP Conf. Proc.* 3152, 040004 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218946>.
18. Пирматов Н.Б., Шерназаров С.Э., Д.К. Якубова, Т.Э. Рашидов. Катта кувватли турбогенераторларнинг статор чулғами стерженларини тўлиб тикилиб қолиши натижасида улардаги қизиқини бартараф этиш чоралари. //Энергия ва ресурс тежаш муоммолари. 2023. - №3. -58-68 б.
19. Пирматов Н.Б., Шерназаров С.Э. Иссиқлик электр станцияларида ишлатилаётган турбогенераторнинг статор чулғамини сувли совутиш тизимида бўлаётган носозликлар ва уларни бартараф этиш усуллари. //Энергия ва ресурс тежаш муоммолари. 2023. - №4. -88-95 б.

REFERENCES

1. Kopylov, I. P. *Electrical machines*. Vysshaya Shkola. (2004).
2. RAO “UES of Russia.” *Guidelines for the use of an expert system for evaluating the maintenance and repair of turbogenerators (RD 153-34.1-30.608-2000)*. (2000). (In Russian).
3. Sokolov, S. E., & Cheremisinov, Yu. G. *Operation, repair, and testing of auxiliary electrical equipment and secondary devices of power plants*. AIES. (2005). (In Russian).
4. Mamikonyants, L. G., Samorodov, Yu. N., Sheyko, P. A., *Methods and results of inspections of long-operating turbo- and hydrogenerators; criteria for assessing the possibility of extending their service life*. In *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Assessment of the Technical Condition of Electrical Equipment of Power Systems”* (ENAS). (1999). (In Russian).

5. Kulakovskiy, V. B., Samorodov, Yu. N., & Khanakov, A. S. On the limit state of stator windings of turbogenerators with micalent compound insulation. *Electrical Stations*, (9). (1996). (In Ukrian).
6. Butov, A. V., Kaplin, V. N., Krylov, M. P., & Pikulsky, V. A. Use of modern diagnostic methods for stator cores during turbogenerator repairs. *Electrical Stations*, (11). (2000). (In Russian).
7. Samorodov, Yu. N. *Determining the causes of malfunctions in stator and rotor windings of turbogenerators*. Proceedings of the 2nd Specialized School-Seminar, Moscow. (2001) (In Russian).
8. Berezhanskiy, V. B., Moiseev, A. V., & Rostik, G. V. Method for monitoring short circuits between sheets of the active steel of electrical machine cores and device for its implementation (Patent No. 2082274). (1994). (In Ukrian).
9. ENAS. *Volume and standards of testing electrical equipment (RD 34.45-51.700-97)*. (1998). (In Russian).
10. Alekseev, B. A. *Determining the condition (diagnostics) of large turbogenerators*. ENAS. (1997). (In Russian).
11. Maslov, V. V. Measurement of partial discharges for diagnosing stator winding insulation. *Bulletin of VNIIE*. (1998). (In Russian).
12. Edmonds J. S., Daneshpooy A., et al. Turbogenerator stator core study: Localized heating caused by damage in laminations // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2022. – Vol. 58, Iss. 2. – Pp. 1845–1853. – DOI: 10.1109/TIA.2021.3133541.
13. Zhang G., Liang Y., Liu H., et al. Calculation and analysis of temperature field in stator winding of large turbogenerator // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, Iss. 7. – Article 1234. – DOI: 10.3390/en12071234.
14. Hu P., Sun Y., Li W., et al. Numerical simulation and experimental research of the stator temperature field of a 300 MW turbogenerator // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 105. – Pp. 381–389. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.
15. Wang L., Wang Y., Zhang Z., et al. Impact of cooling duct blockage on the temperature distribution of stator winding in turbogenerators // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 58123–58131. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2981245.
16. Li W., Li J., Zhao Y., et al. Thermal analysis of large turbogenerator stator winding based on subdomain finite element method // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2016. – Vol. 31, Iss. 1. – Pp. 156–164. – DOI: 10.1109/TEC.2015.2456041.
17. Isakhodjayev, Kh., Shernazarov, S., Yakubova, D. Analysis of the method for cooling stator wires of the standard of high power turbo generators at thermal power plants AIP Conf. Proc. 3152, 040004 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218946>
18. Pirmatov, N. B., Shernazarov, S. E., Yakubova, D. K., & Rashidov, T. E. Measures to eliminate overheating of stator winding bars of high-power turbogenerators caused by blockage. *Problems of Energy and Resource Saving*, (2023). (3), 58–68.
19. Pirmatov, N. B., Shernazarov, S. E. (2023). Malfunctions in the water-cooling system of stator windings of turbogenerators at thermal power plants and methods for eliminating them. *Problems of Energy and Resource Saving*, (4), 88–95.