DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

UDK 621.313.2:536.24

TURBOGENERATORLARNING ROTORINI QIZISHI JARAYONLARINI TADQIQ QILISH

Badalov Abdumalik, *kafedra dotsenti,*
Termodinamika va energetika auditi kafedrasi,
Ismailova Zumrad, *stajyor-tadqiqotchi,*
Termodinamika va energetika auditi kafedrasi,
E-mail: Ismailovazumrad22@gmail.com
Toshkent davlat texnika universiteti

Annotatsiya: *Mazkur maqolada turbogenerator rotorining ishlash jarayonida yuzaga keladigan issiqlik ajralishi va qizish jarayonlari tadqiq qilinadi. Rotorning issiqlik holatiga elektr yo‘qotishlari, rotor chulg‘amidagi mis yo‘qotishlari, mexanik yo‘qotishlar, shamollatish va sovitish sharoitlarining ta’siri ko‘rib chiqiladi. Rotor haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini tavsiflovchi issiqlik balansi asosida soddalashtirilgan matematik model taklif etiladi. Tadqiqotda rotor haroratining yuklama, qo‘zg‘atish toki va sovitish sharoitlariga bog‘liqligi tahlil qilinadi. Hisoblash natijalari asosida rotorning qizish jarayonini nazorat qilish, issiqlik yuklamasini baholash va ekspluatatsion rejimlarni takomillashtirish bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqiladi.*

Аннотация: *В статье исследуются процессы тепловыделения и нагрева ротора турбогенератора в процессе эксплуатации. Рассмотрено влияние электрических и механических потерь, потерь в медной обмотке ротора, вентиляции и условий охлаждения на его тепловое состояние. На основе уравнения теплового баланса предложена упрощённая математическая модель изменения температуры ротора во времени. Проанализирована зависимость температуры от нагрузки, тока возбуждения и условий охлаждения. На основе расчётных результатов разработаны рекомендации по контролю нагрева ротора, оценке тепловой нагрузки и совершенствованию эксплуатационных режимов.*

Annotation: *The paper investigates heat generation and heating processes in turbogenerator rotors during operation. The influence of electrical and mechanical losses, copper losses in the rotor winding, ventilation and cooling conditions on the rotor thermal state is considered. A simplified mathematical model of rotor temperature variation over time is proposed based on the heat balance equation. The dependence of rotor temperature on load, excitation current and cooling conditions is analyzed. Based on the calculated results, recommendations are developed for monitoring rotor heating, evaluating thermal loading and improving operating conditions.*

Kalit so‘zlar: *turbogenerator, rotor, qizish jarayoni, rotor chulg‘ami, issiqlik balansi, mis yo‘qotishlari, sovitish, harorat, issiqlik almashinuvi, issiqlik monitoringi, elektr energetika, termik holat, ekspluatatsiya.*

Ключевые слова: *турбогенератор, ротор, нагрев, обмотка ротора, тепловой баланс, потери в меди, охлаждение, температура, теплообмен, тепловой мониторинг, электроэнергетика, тепловое состояние, эксплуатация.*

Keywords: *turbogenerator, rotor, heating process, rotor winding, heat balance, copper losses, cooling, temperature, heat transfer, thermal monitoring, electric power engineering, thermal condition, operation.*

Kirish. Turbogeneratorlar issiqlik va atom elektr stansiyalarida mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiruvchi asosiy elektromexanik qurilmalardan biridir. Ularning ishonchli ishlashi stator va rotor qismlarining elektr, magnit, mexanik hamda issiqlik holatiga bog‘liq [1, 2].

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

Ayniqsa, rotorning termik holati generatorning ruxsat etilgan yuklamasi, chulg‘am izolyatsiyasining ishlash sharoiti va umumiy ekspluatatsion ishonchliligini belgilovchi muhim omillardan hisoblanadi [3].

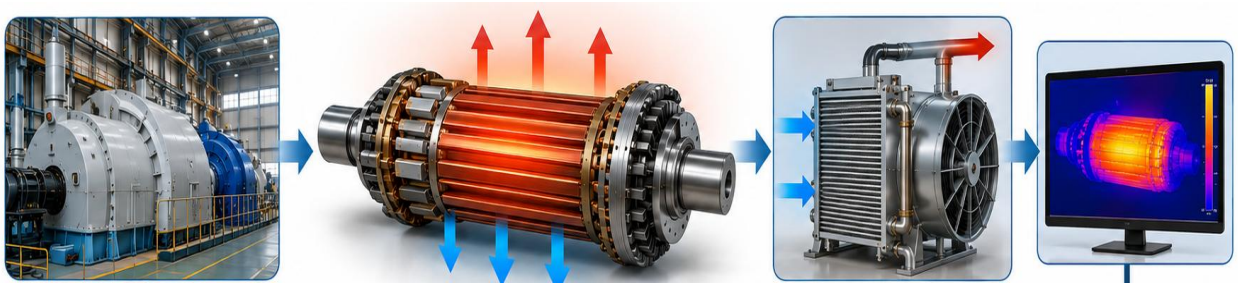
Turbogenerator rotorida yuqori aylanish chastotasi sharoitida elektromagnit va mexanik jarayonlar bir vaqtda kechadi. Qo‘zg‘atish toki rotor chulg‘amidan o‘tganda elektr qarshilik tufayli issiqlik ajraladi. Bundan tashqari, magnit maydonidagi qo‘shimcha yo‘qotishlar, ventilyatsiya va ishqalanish bilan bog‘liq mexanik yo‘qotishlar ham rotorning qizishiga hissa qo‘shadi [1, 4]. Hosil bo‘lgan issiqlik rotor materiali orqali tarqalib, sovitish muhiti yordamida chiqariladi [5, 6].

Rotor haroratining me’yoridan yuqori bo‘lishi chulg‘am izolyatsiyasining tezroq eskirishiga, materiallarda termik kuchlanishlarning ortishiga va rotorning mexanik holatiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli qizish jarayonini faqat maksimal harorat bo‘yicha emas, balki haroratning vaqt bo‘yicha o‘zgarish tezligi va sovitish sharoitlari bilan birgalikda baholash zarur [3, 5].

Tadqiqotning maqsadi turbogenerator rotorida yuzaga keladigan issiqlik ajralishi va qizish jarayonlarini tahlil qilish, rotor haroratining yuklama va sovitish sharoitlariga bog‘liqligini aniqlash hamda uning termik holatini baholash uchun soddalashtirilgan matematik model ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot metodikasi. Rotorning qizish jarayonini tadqiq qilishda issiqlik hosil bo‘lishi va issiqlik chiqarilishi o‘rtasidagi muvozanat asosiy metodik prinsip sifatida qabul qilinadi [5, 7]. Tadqiqot uchun qo‘zg‘atish toki, rotor chulg‘amining qarshiligi, generator yuklamasi, aylanish chastotasi, sovitish muhiti harorati, issiqlik uzatish koeffitsiyenti va rotorning effektiv issiqlik sig‘imi kabi parametrlar olinadi [1, 4].

Rotorning issiqlik jarayonini umumiy holda quyidagi ketma-ketlikda ifodalash mumkin: Elektr yuklama → qo‘zg‘atish toki → issiqlik manbalari → issiqlik balansi → rotor harorati → sovitish → termik holatni baholash (1-rasm).



1-rasm. Turbogenerator rotorining qizish jarayonini tadqiq qilishning konseptual arxitekturasi

Rotor chulg‘amidagi asosiy issiqlik yo‘qotishlari Joul-Lens qonuni bilan aniqlanadi [1, 2]:

$$P_{Cu} = I_f^2 \cdot R_f$$

bu yerda P_{Cu} – rotor chulg‘amidagi mis yo‘qotishlari, W; I_f – qo‘zg‘atish toki, A; R_f – rotor chulg‘amining elektr qarshiligi, Ω.

Haroratning ortishi bilan mis chulg‘amining qarshiligi o‘zgaradi. Soddalashtirilgan holda [1, 7]:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

bu yerda R_0 – boshlang‘ich haroratdagi qarshilik; R_T – T haroratdagi qarshilik; α – qarshilikning harorat koeffitsiyenti; T_0 – boshlang‘ich harorat.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

Mazkur bog‘lanish rotorning qizishi davomida elektr yo‘qotishlari ham o‘zgarishini hisobga olish imkonini beradi.

Rotorning umumiy issiqlik holatini birinchi yaqinlashishda issiqlik sig‘imi va issiqlik uzatish jarayonlari orqali ifodalash mumkin [5, 7]:

$$C \cdot dT/dt = P_{loss} - K\,(T - T_c)$$

bu yerda C – rotorning effektiv issiqlik sig‘imi; T – rotor harorati; t – vaqt; P_{loss} – rotorning umumiy issiqlik yo‘qotishlari; K – issiqlik uzatishning effektiv koeffitsiyenti; T_c – sovitish muhitining harorati.

Tenglama rotor ichida to‘planayotgan issiqlik miqdori bilan sovitish orqali chiqarilayotgan issiqlik miqdori o‘rtasidagi farqni ifodalaydi. Barqaror rejimda $dT/dt \approx 0$ bo‘lganda hosil bo‘layotgan issiqlik va chiqarilayotgan issiqlik o‘zaro muvozanatlashadi.

Rotor haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi

Rotorning issiqlik parametrlari ma’lum vaqt oralig‘ida o‘zgarmas deb qabul qilinganda, qizish jarayoni soddalashtirilgan eksponensial qonun bilan tavsiflanishi mumkin [5, 7]:

$$T(t) = T_c + \Delta T_\infty \cdot (1 - e\text{^}(-t/\tau))$$

bu yerda ΔT_∞ – barqaror rejimdagi rotor va sovitish muhiti haroratlari farqi; τ – rotorning issiqlik vaqt doimiysi. Mazkur ifoda ishga tushirishning dastlabki bosqichida harorat tezroq, keyinchalik esa sekinroq oshishini ko‘rsatadi 1-jadval).

1-jadval

Turbogenerator rotorining qizishiga ta’sir qiluvchi asosiy omillar

№	Omil	Rotor qizishiga ta’siri	Asosiy parametr
1	Qo‘zg‘atish toki	Issiqlik ajralishini oshiradi	I_f
2	Rotor qarshiligi	Mis yo‘qotishlarini belgilaydi	R_f
3	Generator yuklamasi	Termik yuklamaga ta’sir qiladi	P/P_n
4	Sovitish sharoiti	Issiqlik chiqarish intensivligini belgilaydi	K
5	Sovitish muhiti harorati	Yakuniy rotor haroratiga ta’sir qiladi	T_c
6	Aylanish chastotasi	Ventilyatsiya va mexanik yo‘qotishlarga ta’sir qiladi	n
7	Rotor konstruksiyasi	Issiqlik tarqalishiga ta’sir qiladi	geometriya
8	Ekspluatatsiya muddati	Issiqlik almashinuvi holatiga ta’sir qilishi mumkin	t_{exp}

Rotor qizishining muhim omillaridan biri qo‘zg‘atish toki hisoblanadi. Tokning ortishi bilan chulg‘amdagi Joule yo‘qotishlari tokning kvadratiga proporsional ravishda oshadi [1, 2]. Shu sababli qo‘zg‘atish toki, rotor harorati va sovitish parametrlari birgalikda monitoring qilinishi maqsadga muvofiq [3, 6].

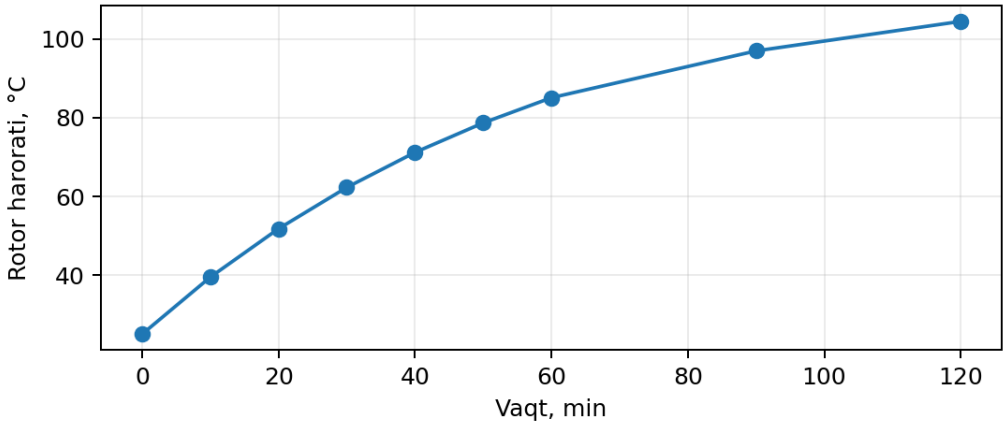
Hisoblash natijalari va tahlil. Metodikani namoyish qilish uchun rotorning boshlang‘ich harorati 25 °C, sovitish muhitining harorati 25 °C deb qabul qilinib, rotor haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi shartli hisob-kitob asosida baholandi (1-rasm). Keltirilgan sonlar real agregatning pasport yoki o‘lchov protokoli o‘rnini bosmaydi; ular metodikani ko‘rsatish maqsadida berilgan (2-jadval).

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

2-jadval

Rotor haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi

Vaqt, min	Rotor harorati, °C	Harorat oshishi, °C
0	25.0	0.0
10	39.5	14.5
20	51.8	26.8
30	62.3	37.3
40	71.2	46.2
50	78.7	53.7
60	85.1	60.1
90	97.0	72.0
120	104.5	79.5



1-rasm. Turbogenerator rotorining vaqt bo‘yicha qizish xarakteristikasi

Hisoblash natijalaridan rotor harorati ishga tushirishning dastlabki bosqichida nisbatan tez ortishi, vaqt o‘tishi bilan esa haroratning o‘sish tezligi kamayishi kuzatiladi. Bunday issiqlik dinamikasi rotorning issiqlik sig‘imi va sovitish orqali issiqlik chiqarilishi o‘rtasidagi bog‘liqlik bilan izohlanadi [5, 7].

Rotorning sovitish sharoiti yomonlashganda issiqlik uzatish koeffitsiyenti kamayadi. Natijada bir xil elektr yuklamasida rotorning muvozanat harorati yuqoriroq qiymatga ko‘tariladi. Amaldagi ekspluatatsiya hujjatlarida ham sovitish muhiti parametrlarining o‘zgarishi generatorning ruxsat etilgan yuklama va tok rejimlariga ta’sir qilishi qayd etilgan [3].

Sovitish orqali issiqlik chiqarilishini baholash

Rotor yuzasidan sovitish muhiti orqali chiqariladigan issiqlik soddalashtirilgan holda quyidagicha ifodalanadi [5, 7]:

$$Q_{cool} = K \cdot A \cdot (T - T_c)$$

bu yerda Q_{cool} – sovitish orqali chiqarilayotgan issiqlik; K – issiqlik uzatish koeffitsiyenti; A – issiqlik almashinish yuzasi; T – rotor harorati; T_c – sovitish muhiti harorati.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

Rotorning termik holatini baholash mezonlari

2-jadval

Termik holat	Kuzatiladigan belgi	Tavsiya etiladigan chora
Barqaror va me’yoriy	Harorat odatdagi diapazonda	Rejali monitoring
Kuzatuv talab qilinadi	Haroratning sekin o‘sish tendensiyasi	Kuchaytirilgan monitoring
Termik yuklama oshgan	Haroratning odatdagidan tezroq o‘sishi	Diagnostik tekshiruv
Yuqori termik yuklama	Harorat yuqori va barqarorlashmayapti	Sovitish tizimini tekshirish
Chegaraga yaqin	Ruxsat etilgan qiymatga yaqinlashish	Yuklama va sovitish rejimini tahlil qilish

Natijalar va muhokama. Tadqiqot natijalari turbogenerator rotorining qizish jarayoni bir nechta o‘zaro bog‘liq omillar ta’sirida shakllanishini ko‘rsatadi. Rotor chulg‘amidagi elektr yo‘qotishlari issiqlik hosil bo‘lishining asosiy manbalaridan biri bo‘lib, ular qo‘zg‘atish tokining kvadratiga bog‘liq [1, 2].

Rotorning harorat rejimini faqat maksimal harorat orqali baholash yetarli emas. Haroratning vaqt bo‘yicha o‘zgarish xarakteri ham muhim diagnostik parametrdir. Bir xil yuklamada haroratning avvalgi ish rejimlariga nisbatan tezroq ortishi sovitish samaradorligining pasayishi yoki issiqlik yuklamasining oshganligini ko‘rsatishi mumkin [3, 5, 6].

Tadqiqotda keltirilgan soddalashtirilgan model rotorning qizish va sovish jarayonlarini dastlabki baholash uchun metodik asos beradi. Real obyektga tatbiq etishda rotor konstruksiyasi, sovitish sxemasi, materiallarning issiqlik-fizik xossalari, generatorning nominal parametrlari va ishlab chiqaruvchi ko‘rsatmalari alohida hisobga olinishi kerak [3, 4].

Turbogenerator rotorining qizish jarayonini amaliy tadqiq qilish uchun quyidagi ketma-ketlik tavsiya etiladi: mavjud texnik hujjatlarni yig‘ish; qo‘zg‘atish toki va generator yuklamasini qayd qilish; rotor va sovitish muhiti haroratlarini o‘lchash; vaqt bo‘yicha harorat trendini shakllantirish; issiqlik balansini hisoblash; turli yuklama rejimlarini taqqoslash; sovitish samaradorligini baholash; aniqlangan natijalar asosida ekspluatatsion tavsiyalar ishlab chiqish [3, 6].

Tadqiqotning ilmiy yangiligi turbogenerator rotorining qizish jarayonini elektr yuklama, rotor chulg‘amidagi issiqlik yo‘qotishlari va sovitish sharoitlarini o‘zaro bog‘langan holda baholashga asoslangan yondashuvni shakllantirishdan iborat. Rotor haroratining joriy qiymati bilan bir qatorda uning vaqt bo‘yicha o‘zgarish tezligini ham tahlil qilish taklif etildi. Issiqlik balansi asosidagi model turli ekspluatatsion rejimlarni taqqoslash va termik yuklamani dastlabki baholash imkonini beradi [5, 7].

Xulosa. Turbogenerator rotorining qizish jarayonlari tadqiq qilindi va uning termik holatiga ta’sir qiluvchi asosiy omillar aniqlandi. Rotor chulg‘amidagi Joule yo‘qotishlari, qo‘zg‘atish toki, generator yuklamasi va sovitish sharoitlari rotor haroratining shakllanishida muhim ahamiyatga ega ekanligi ko‘rsatildi.

Issiqlik balansi asosidagi soddalashtirilgan matematik model rotor haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini va issiqlik hosil bo‘lishi bilan sovitish jarayoni o‘rtasidagi bog‘liqlikni baholash imkonini beradi. Harorat monitoringida faqat joriy qiymatni emas, balki uning dinamikasi, qo‘zg‘atish toki va sovitish parametrlarini birgalikda hisobga olish maqsadga muvofiq.

Kelgusida modelni real turbogeneratorning o‘lchov ma’lumotlari asosida tekshirish, rotorning uch o‘lchamli harorat maydonini sonli modellashtirish hamda sovitish tizimining turli rejimlarini tajribaviy taqqoslash tavsiya etiladi.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.51

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. – Toshkent: O‘zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. – 406 b.

2. Shaymatov B.X., Xafizov I.I., Xolmurodov M.B., Sattorov T.A. Elektr mashinalari. – Buxoro: “Sadriddin Salim Buxoriy”, “Durdona” nashriyotlari, 2021. – 636 b.

3. Allayev Q.R., Siddiqov I.H., Hakimov M.H., Ibragimov R.I., Siddiqov O.I., Shamsutdinov H.F. Stansiya va podstansiyalarning elektr qismi. – Toshkent: Cho‘lpon nomidagi NMIU, 2014. – 304 b.

4. Кобзарь К.А., Гакал П.Г., Овсянникова Е.А., Третьяк А.В. Тепловое состояние обмотки ротора турбогенератора с непосредственным охлаждением водородом // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т. 18, № 4/1.

5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомель А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

6. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1980.

7. Космынина Н.М., Федянин В.В. Турбогенераторы для электростанций в примерах и заданиях. Ч. 1. Практикум. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021.