

УДК 621.313.322

**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ  
СТЕРЖНЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

**©Кипоренко А. С., Мазорчук К. И.**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

**Інформація про авторів:**

**Кіпоренко Ганна Сергіївна**, ORCID: 0000-0002-6498-6142; a.kiporenko@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Мазорчук Костянтин Іванович**, ORCID: 0000-0003-2231-1013; k.mazorchuk@gmail.com; здобувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Анализируются виды повреждений и причины выхода из строя мощных турбогенераторов, на основе чего предложена методика проведения расчетного анализа обеспечения безопасности его работы.

Проведен анализ научных трудов отечественных и зарубежных ученых в области теплообмена, а также, нормативного обеспечения безопасности эксплуатации турбогенераторов.

На основе проведенного анализа представлена методика расчетных исследований теплоотдачи и численные результаты расчетных исследований распределения теплообмена в элементах стержня обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ для Южноукраинской и Хмельницкой АЭС.

Показано, что при своевременном анализе теплоотдачи при охлаждении стержней обмотки возможно выявление нарушений турбогенераторов.

Предложены рекомендации, относительно проведения технических работ при нарушении теплообмена стержней обмотки турбогенератора, с целью повышения безопасности и эффективности его эксплуатации.

**Ключевые слова:** турбогенератор; теплоотдача; безопасность; атомная электростанция.

**Кіпоренко Г. С., Мазорчук К. І.** «Розрахунковий аналіз тепловіддачі при охолодженні стрижнів обмотки статора турбогенератора».

Аналізуються види пошкоджень і причини виходу з ладу потужних турбогенераторів, на основі чого запропоновано методику проведення розрахункового аналізу забезпечення безпеки його роботи.

Проведено аналіз наукових праць вітчизняних і зарубіжних вчених в області теплообміну, а також, нормативного забезпечення безпеки експлуатації турбогенераторів.

На основі проведеного аналізу представлено методику розрахункових досліджень тепловіддачі і чисельні результати розрахункових досліджень розподілу теплообміну в елементах стрижня обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ для Південноукраїнської і Хмельницької АЕС.

Показано, що при своєчасному аналізі тепловіддачі при охолодженні стрижнів обмотки можливе виявлення порушень турбогенераторів.

Запропоновано рекомендації, щодо проведення технічних робіт при порушенні теплообміну стержнів обмотки турбогенератора, з метою підвищення безпеки та ефективності його експлуатації.

**Ключові слова:** турбогенератор; тепловіддача; безпека; атомна електростанція.

**Kiporenko A., Mazorchuk K.** “Calculated analysis of heat transfer cooling bars turbogenerator stator windings”.

Analyzes the types of damages and causes of failure of the powerful turbogenerators on the basis, of which the technique of computational analysis ensuring the safety of its operation.

The analysis of the scientific works local and foreign scientists in the field of heat transfer and also normative safety operation of turbogenerators.

Based on this analysis the technique of calculation research of heat transfer and numerical results of calculation research allocation of heat transfer in bar elements of the stator winding of the turbogenerator TVV-1000-2U3 for Pivdennoukrainska and Khmelnytsky nuclear power plant.

It is shown that with timely analysis of the heat transfer cooling coil bars possible detection of violations of turbogenerators.

The recommendations on the conduct of the technical work in violation of the heat exchange coil bars turbine generator, in order to increase the safety and efficiency of its operation.

**Keywords:** turbine generator; heat; safety; nuclear power plant.

## 1. Введение

В Украине с каждым днем увеличивается потребность в электрической энергии, что обусловлено экономическими и социальными изменениями в стране. Возрастающие потребности и невозможность увеличения энергомощности вынуждают к повышению эффективности работы действующих объектов энергетики. Основным фактором неэффективного производства электроэнергии на атомных электростанциях, является повреждение турбогенераторов (ТГ), что значительно снижает выработку электроэнергии. К повреждающим факторам, воздействующим на стержни обмотки статора ТГ, относятся следующие:

- температурные режимы при эксплуатации оборудования, включая возможные циклические колебания;
- неблагоприятные вибродинамические колебания на узел «коллектор дистиллята – патрубки –внешние трубопроводы» конструкции лобовых частей обмотки статора;
- воздействие термомеханических напряжений, возникающих в обмотке статора при многократных изменениях нагрузочных режимов;
- воздействие химически активных веществ;
- механические повреждения при проведении ремонтных и монтажных работ.

Как правило, деградация протекает интенсивнее при одновременном воздействии на оборудование нескольких повреждающих факторов, например: наличие локальных перегревов стержней обмотки статора, наличие механических примесей в составе охлаждающего дистиллята, повышенные вибрации на выводах шин обмотки статора и др.

**2. Анализ последних исследований и постановка задачи**

На сегодняшний день диагностирование состояния полых проводников осуществляется с помощью термопреобразователей сопротивления (ТС), наложенных на изоляцию каждого стержня со стороны слива дистиллята либо под пазовый клин вблизи выхода из паза. ТУ на турбогенератор рекомендует допустимое количество заглушенных полых проводников – не более одного. При закупорке 2-х проводников, их температура по расчетным данным в три раза превышает нормативную. Но, как показывает опыт, не всегда происходит значительный подъем температуры. Так, например, если между закупоренным проводником и ТС находится полый проводник с циркуляцией дистиллята, подъем температуры может быть незначительным. Кроме того, чувствительность ТС к изменению температуры меди стержня существенно зависит от степени прижатия ТС к изоляции стержня и уменьшается при ослаблении клиновки паза. Таким образом, наблюдается низкая эффективность нормативных методов контроля в части обнаружения закупорки полых проводников [1, 2].

Для проведения анализа охлаждения стержней обмотки статора генератора необходимо понимать физические процессы передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному либо непосредственно (при контакте), либо через разделяющую (тела или среды) перегородку из какого-либо материала [3]. Когда физические тела одной системы находятся при разной температуре, то происходит передача тепловой энергии, или теплопередача от одного тела к другому до наступления термодинамического равновесия. Самопроизвольная передача тепла всегда происходит от более горячего тела к более холодному, что является следствием второго закона термодинамики.

**3. Расчетный анализ теплоотдачи при охлаждении стержней обмотки статора ТГ**

Способность вещества проводить тепло характеризуется коэффициентом теплопроводности (удельной теплопроводностью). Численно эта характеристика равна количеству теплоты, проходящей через образец материала толщиной в единицу длины (1 м), площадью в единицу площади (1 м<sup>2</sup>), за единицу времени (1 секунду) при единичном температурном градиенте (1 К). В метрической системе мер единицей измерения коэффициента теплопроводности является Вт/(м·К).

В установившемся режиме плотность потока энергии, передающейся посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры [4]:

$$\vec{q} = -\kappa \text{grad}(T), \quad (1)$$

где  $\vec{q}$  – вектор плотности теплового потока - количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной каждой оси;

$\kappa$  – коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность);

$T$  – температура. Минус в правой части показывает, что тепловой поток направлен противоположно вектору  $\text{grad } T$  (то есть в сторону скорейшего убывания температуры). Это выражение известно как закон теплопроводности Фурье.

Коэффициент теплопроводности газов определяется формулой

$$\lambda = \frac{ik}{3\pi^{3/2}d^2} \sqrt{\frac{RT}{M}}, \quad (2)$$

где:  $i$  – сумма поступательных и вращательных степеней свободы молекул (для двухатомного газа  $i=5$ , для одноатомного  $i=3$ );

$k$  – постоянная Больцмана;

$M$  – молярная масса;

$T$  – абсолютная температура;

$d$  – эффективный диаметр молекул;

$R$  – универсальная газовая постоянная.

Из формулы видно, что наименьшей теплопроводностью обладают тяжелые одноатомные (инертные) газы, наибольшей – легкие многоатомные, что подтверждается практикой, максимальная теплопроводность из всех газов – у водорода.

В нашем случае теплообмен через поверхность включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной подвижной среде. Интенсивность передачи теплоты характеризуется коэффициентом теплопередачи  $k$ , численно равным количеству теплоты, которое передаётся через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между жидкостями в 1 К; размерность  $k$  –  $вт/(м^2 \times К)$  [ $ккал/м^2 \times ^\circ C$ ]. Величина  $R$ , обратная коэффициенту теплопроводности, называется полным термическим сопротивлением.

Например,  $R$  однослойной стенки

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от горячей жидкости к поверхности стенки и от поверхности стенки к холодной жидкости;

$\delta$  – толщина стенки;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

В большинстве встречающихся на практике случаев коэффициент  $T$  определяется опытным путём. При этом полученные результаты обрабатываются методами подобия теории.

Принцип расчета теплового потока через цилиндрическую стенку заключается в следующем: рассмотрим однородную трубу (рис. 1) с теплопроводностью  $\lambda$ , внутренний диаметр  $d_1$ , наружный диаметр  $d_2$ , длина  $l$ .

Внутри трубы находится холодная среда с температурой  $t'_{жс}$ , а снаружи холодная среда с температурой  $t''_{жс}$ .

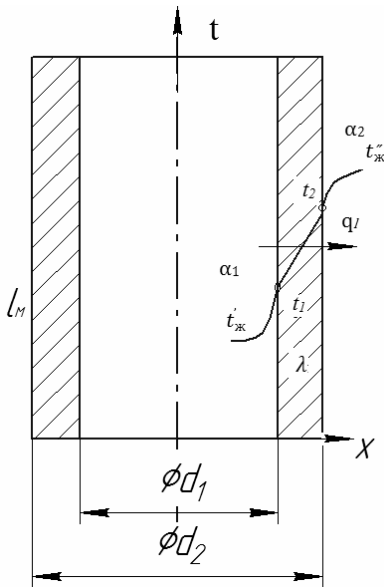
Количество теплоты, переданной от горячей среды к внутренней стенке трубы по закону Ньютона-Рихмана имеет вид:

$$Q = p d_1 a_1 l (t'_{жс} - t_1), \quad (4)$$

где  $a_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей среды с температурой  $t'_{жс}$  к поверхности стенки с температурой  $t_1$ .

Тепловой поток, переданный через стенку трубы определяется по уравнению:

$$Q = 2 \cdot p \cdot l \cdot \lambda \cdot (t_1 - t_2) / \ln(d_2 / d_1). \quad (5)$$



**Рис. 1** – Схема прохода теплового потока через цилиндрическую стенку стержня

Тепловой поток от второй поверхности стенки трубы к холодной среде определяется по формуле:

$$Q = p \cdot d_2 \cdot a_2 \cdot l \cdot (t_1 - t''_{ж}), \quad (6)$$

где  $a_2$  – коэффициент теплоотдачи от второй поверхности стенки к холодной среде с температурой  $t''_{ж}$ .

Решая эти три уравнения получаем:

$$Q = p \cdot l \cdot (t'_1 - t''_2) K, \quad (7)$$

где  $K_1 = 1/[1/(a_1 d_1) + 1/(2 \ln(d_2/d_1)) + 1/(a_2 d_2)]$  – линейный коэффициент теплопередачи, или

$R_1 = 1/K_1 = [1/(a_1 d_1) + 1/(2 \ln(d_2/d_1)) + 1/(a_2 d_2)]$  – полное линейное термическое сопротивление теплопередачи через однослойную цилиндрическую стенку;

$1/(a_1 d_1), 1/(a_2 d_2)$  – термические сопротивления

теплоотдачи поверхностей стенки;

$1/(2 \ln(d_2/d_1))$  – термическое сопротивление стенки.

Для многослойной ( $n$  слоев) цилиндрической стенки полное линейное термическое сопротивление будет определяться по следующей формуле:

$$R_1 = 1/K_1 = [1/(a_1 d_1) + 1/(2 l_1 \ln(d_2/d_1)) + 1/(2 l_2 \ln(d_3/d_2)) + \dots + 1/(2 l_n \ln(d_{n+1}/d_n)) + 1/(a_2 d_n)], \quad (8)$$

Также необходимо провести расчетный анализ по теплоотдаче с различными скоростями движения охлаждающей жидкости.

Для этого необходимо рассчитать поверхность нагрева:

$$F = l \cdot \pi d, \quad (9)$$

где  $l$  – длина канала;  $d$  – внутренний диаметр канала.

Среднеарифметическую температуру воды:

$$t_{ж} = 0,5(t'_{ж} + t''_{ж}), \quad (10)$$

где  $t'_{ж}, t''_{ж}$  – соответственно температура воды на входе в каналы и выходе (рис. 1).

Число Прандтля – критерий подобия тепловых процессов в жидкостях и газах, учитывающий влияние физических свойств теплоносителя на теплопередачу:

$$Pr_{ж} = 0,88$$

Количество передаваемого тепла (Вт) определяется из выражения:

$$Q = G c_{ж} (t''_{ж1} - t'_{ж1}),$$

где  $G$  – массовый расход (кг/с).

Число Рейнольдса для потока воды:

$$Re = v_n d_k / \nu_{ж}. \quad (11)$$

Число Нуссельта ( $Nu$ ) критерий подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена определяется как:

$$Nu = 0,21 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (12)$$

Тогда коэффициент теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>·°С) равен:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}. \quad (13)$$

Для расчета необходимо знать физические свойства воды и используемые материалы, которые приводятся ниже.

Физические свойства воды при среднеарифметической температуре:

$$\rho_{жс} = 1000, \text{ кг/м}^3;$$

$$c_{жс} = 4,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\lambda_{жс} = 0,599 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)};$$

$$\nu_{жс} = 0,658 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

Физические свойства меди:

$$\rho_{жс} = 8800, \text{ кг/м}^3;$$

$$c_{жс} = 0,38 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\lambda_{жс} = 403,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)};$$

Физические свойства стали:

$$\rho_{жс} = 7850, \text{ кг/м}^3;$$

$$c_{жс} = 0,46 - 0,48 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\lambda_{жс} = 58,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)};$$

Проведем расчет теплоотдачи в контуре охлаждения стержней обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000.

Поверхность нагрева рассчитываем по формуле (9):

$$F = 8 \cdot 3,14 \cdot 0,028 = 0,703 \text{ м}^2$$

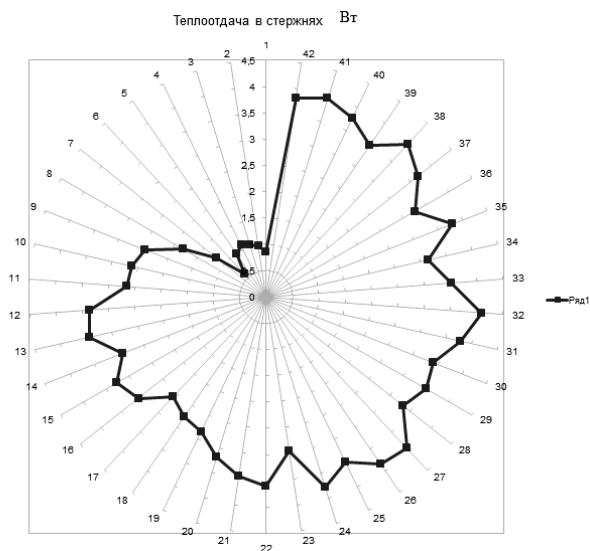
Среднеарифметическую температуру воды (10):

$$t_{жс} = 0,5(37,8 + 37) = 37,4 \text{ °С}$$

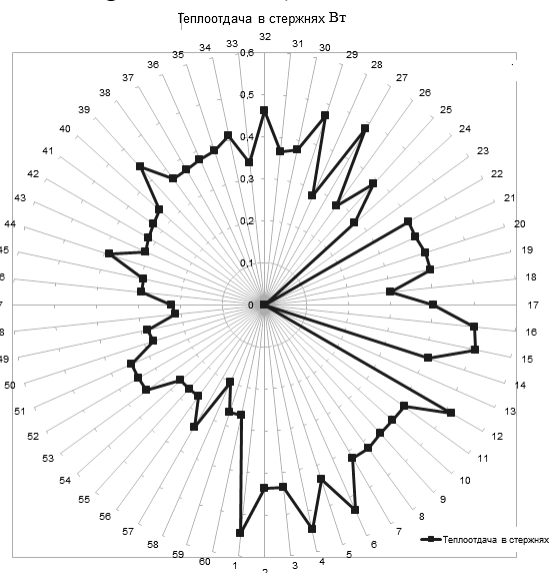
Количество передаваемого тепла определяется из выражения (11):

$$Q = 0,39 \cdot 4,2(37,5 - 37) = 0,81 \text{ Вт}$$

На диаграмме (рис. 2) представлена теплоотдача стержней в Вт (блок №2 ОП ХАЭС).



**Рис. 2** – Теплоотдача стержней в Вт (блок №2 ОП ХАЭС)



**Рис. 3** – Теплоотдача стержней в Вт (блок №1 ОП ЮУАЭС)

На диаграмме (рис. 3) представлена теплоотдача стержней в Вт (блок № 1 ЮУАЭС).

Как показали расчетные исследования, теплоотдача на блоке №2 ХАЭС удовлетворяет процессам эксплуатации, а теплоотдача на блоке №1 ЮУАЭС на некоторых стержнях недостаточна. В связи с этим предлагается проведение диагностики состояние проводников стержней и провести очистку (каналы 13, 23).

**Динаміка та міцність машин**

---

**Выводы**

Предложенный расчетный анализ дает возможность проведения диагностики стержней статора турбогенератора и определить объем необходимых операций по повышению эффективности и безопасности его эксплуатации. А при систематическом проведении предложенной диагностики состояния, на основе расчетного анализа стержней обмотки статора турбогенератора, обеспечить надежность эксплуатации оборудования.

**Список использованных источников:**

1. Васильев В. С. Модернизация турбогенераторов – опыт и перспективы / В. С. Васильев, В. И. Иогансен // *Электросила*. – 2004. – №43. – С. 18–24.
2. Розрахунок витрат охолоджуючої води в системі охолодження обмотки статорів потужних турбогенераторів для забезпечення експлуатаційної безпеки блоків АЕС / К. І. Мазорчук, М. П. Гиря, Г. С. Кіпоренко, С. М. Поліщук // *Системи обробки інформації*. – 2015. – № 5. – С. 177-180.
3. Виговський О. В. Аналіз тривимірного розподілення втрат і нагріву в крайніх пакетах осердя статора турбогенератора потужністю 100 МВт / О. В. Виговський // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр.* – Київ: ІЕД НАНУ. – 2003. – №1. – С. 76–82.
4. Виговський В. І. Тепловий стан обмотки статора потужного турбогенератора з водяним охолодженням при наявності закупорки порожнистих провідників / В. І. Виговський, О. В. Виговський // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр.* – Київ: ІЕД НАНУ. – 2002. – №2(2). – С. 76–79.
5. Кіпоренко Г. С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: 05.01.02 / Г. С. Кіпоренко; Укр. інж.-пед. акад. — Харків, 2010. — 20 с.

**References**

1. Vasilyev, V & Iogansen, V 2004, 'Modernizatsiya turbogeneratorov – opyt i perspektivy', *Elektrosila*, no. 43, pp. 18-24.
2. Mazorchuk, K, Hyria, M, Kiporenko, H & Polishchuk, S 2015, 'Rozrakhunok vytrat okholodzhuiuchoi vody v systemi okholodzhennia obmotky statoriv potuzhnykh turboheneratoriv dlia zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky blokiv AES', *Systemy obrobky informatsii*, no. 5, pp. 177-180.
3. Vyhovskiy, O 2003, 'Analiz tryvymirnoho rozpodilennia vtrat i nahrivu v krainikh paketakh oserdia statora turboheneratora potuzhnistiu 100 MVt', *Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, no. 1, pp. 76-82.
4. Vyhovskiy, V & Vyhovskiy, O 2002, 'Teplovi stan obmotky statora potuzhnoho turboheneratora z vodianym okholodzhenniam pry naiavnosti zakuporky porozhnistykh providnykiv', *Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, no. 2(2), pp. 76-79.
5. Kiporenko, H 2010, 'Udoskonalennia normatyvnoho zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky truboprovodnykh system atomnykh elektrostantsii', *Kand. tekh.n. abstract, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv*.

Стаття надійшла до редакції 11 листопада 2015 р.