



УДК 621.313.3

## ЗАВИСИМОСТЬ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ОТ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ГАЗА

### DEPENDENCE OF VENTILATION LOSS OF THE TURBOGENERATOR FROM COOLING GAS

**Павлова Анастасия Юрьевна**, магистрант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: n-nastya94@mail.ru, Тел.: +7(912)225-86-21

**Родионов Игорь Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. Тел.: +7(912)669-71-62

**Anastasia U. Pavlova**, Master student, Department «Electric machine», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: n-nastya94@mail.ru, Ph.: +7(912)225-86-21

**Igor E. Rodionov**, Candidate of technical Sc., Associate Prof., Department «Electric machine», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. Ph.: +7(912)669-71-62

**Аннотация:** В статье ставится задача рассмотреть влияние разных охлаждающих газов (воздух; водород; гелий) на потери на вентиляцию турбогенератора при одних и тех же габаритах рассматриваемой машины.

**Abstract:** The article aims to consider the influence of different cooling gases (air, hydrogen, helium) on the ventilation losses of the turbogenerator at the same dimensions of the machine.

**Ключевые слова:** косвенное охлаждение; турбогенератор; воздух; водород; гелий; вентиляционные потери.

**Keywords:** indirect cooling; turbogenerator; air; hydrogen; helium; ventilation losses.

В настоящее время при разработке турбогенераторов (до 400МВт) существует тенденция замены водородного охлаждения. Это обусловлено необходимостью обеспечения надежности и живучести энергосистем. Выход из строя генератора достаточно большой мощности требует мобилизации в энергетической системе такой же резервной мощности для замещения, что не всегда возможно. [1, 2, 3]

В зависимости от применяемой в системах охлаждающей среды различают турбогенераторы: с газовым, жидкостным или смешанным типом охлаждения. [1, 2, 3]

В турбогенераторе вентиляционные потери составляют 25 – 35% общих потерь. Однако быстрое увеличение потерь на трение с увеличением размеров бочки ротора является одним из основных факторов, ограничивающих рост единичной мощности турбогенераторов.

Гелиевое охлаждение видится перспективной альтернативой водородному охлаждению. Рассмотрим подробнее плюсы охлаждающих сред.

Перечислим основные достоинства и недостатки применения водородного и воздушного охлаждения.

#### ПРЕМЕНЕНИЕ ВОДОРОДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Для того чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняют с искусственным охлаждением.

С кислородом и воздухом водород образует взрывоопасную смесь. Смесь водорода с кислородом в соотношении 2:1 представляет собой гремучий газ. При этом пределы взрываемости в процентном соотношении следующие: с кислородом 4,1–96 об. %, а с воздухом 4–75 об. %. Физиологически водород инертен, а при высоких концентрациях способен вызвать удушье. Возможно наркотическое воздействие при очень высоких давлениях.

Водородное охлаждение эффективнее воздушного, так как водород как охлаждающий газ по сравнению с воздухом имеет ряд существенных преимуществ. Он имеет 8.25 раз более высокую теплопроводность. Это

обстоятельство предопределяет малое тепловое сопротивление прослоек водорода в изоляции и зазорах пазов. Плотность водорода по сравнению с воздухом меньше в 13.63 раза.

**ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Турбогенераторы с воздушным охлаждением отличаются надежностью, взрывобезопасностью и удобством при эксплуатации, уменьшенный объем вспомогательного оборудования, сокращенный срок монтажа. Следствием взрывобезопасности является уменьшение толщины обшивки корпуса турбогенератора, что соответственно снижает стоимость турбогенератора.

К отрицательным сторонам такого турбогенератора можно отнести большие по сравнению с двумя другими газами потери и как следствие линейка турбогенераторов с воздушным охлаждением ограничена небольшими мощностями.

На данный момент турбогенераторы с воздушным охлаждением имеют наибольшее распространение из – за выше перечисленных преимуществ.

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕЛИВОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Гелий получают методом фракционной конденсации из природных газов, образующихся при распаде урансодержащих горных пород. Газообразный гелий не горюч, не токсичен, не взрывоопасен. Однако в случае высокой концентрации в воздухе может вызвать состояние кислородной недостаточности и удушье.

Из этого можно сделать вывод, что коэффициент полезного действия в турбогенераторе с гелиевым охлаждением должен быть больше чем у турбогенератора с воздушным охлаждением и меньше чем в турбогенераторе с водородным охлаждением.

Для гелия нет необходимости делать конструкцию бака такую же как для водородного охлаждения, это снижает затраты стали турбогенератора по сравнению с турбогенератором с водородным охлаждением. Так же необходимо сравнить физические параметры всех трех газов. Сведем их в таблицу 1.

Таблица 1.  
Сравнение параметров охлаждающей среды

	Гелий	Водород	Воздух
Плотность (при н. у.) кг/м <sup>3</sup>	0,1785	0,08987	1,225
Температура кипения °С	-268,94	-252,87	-192
Теплопроводность Вт/(м·К)	0,152	0,1815	0,022
Удельная теплоемкость (Дж/кг·К)	5,2	14,3	0,717
Относительная скорость охлаждения м/с	0,002	0,002	0,008

Гелиевое охлаждение по сравнению с водородным чуть менее эффективно. Гелий по сравнению с водородом имеет в 1,19 раз менее высокую теплопроводность, однако тот же гелий по сравнению с воздухом имеет в 6.9 раз большую теплопроводность. Плотность же гелия по сравнению с водородом в 1.99 раз меньше. Плотность гелия по сравнению с воздухом в 6.86 раз меньше.

**СРАВНЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАЗНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ГАЗАХ**

Ввиду того, что рассматривается машина с одинаковым электромагнитным ядром, в которой меняется только охлаждающий газ, изменения появляются только в формулах, представленных ниже. [4]

Потери на трение гладкого (без рифления) ротора об охлаждающий газ.

$$P_{тр} = 57,3 \cdot 10^3 \cdot D_2^4 \cdot l_2 \cdot P_{г} \quad (1)$$

Потери на трение двух бандажных колец ротора об охлаждающий газ

$$P_{бк} = 57,3 \cdot 10^3 \cdot D_{бк}^4 \cdot l_{бк} \cdot P_{г} \quad (2)$$

Потери от трения об охлаждающий газ боковых поверхностей каналов рифления

$$P_{риф} = 2,7 \cdot n_{риф} \cdot [D_2^5 - (D_2 - 2 \cdot h_{риф})^5] \cdot P_{г} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Отводимые газом потери

$$P' = P_{с} + P_{кн} + P_{2н} + P_{тр} + P_{бк} + P_{риф} \quad (4)$$

Подогрев газа на вентиляторе

$$U_{\Gamma} = \frac{P' \cdot 10^{-3}}{k \cdot (\theta_{\Gamma} - \theta'_{\Gamma}) \cdot P_{\Gamma}} \quad (5)$$

Потери мощности на вентиляторе

$$P_{\text{вент}} = U_{\Gamma} \cdot \frac{M_{\Gamma} \cdot P_{\Gamma}}{\eta_{\text{вент}}} \quad (6)$$

Таблица 2.

Сравнение вентиляционных потерь турбогенераторов разных мощностей

Мощность МВт	Охлаждающий газ		
	водород	воздух	гелий
110	$4,12 \cdot 10^4$	$2,12 \cdot 10^5$	$8,54 \cdot 10^4$
200	$1,536 \cdot 10^5$	$4,628 \cdot 10^5$	$3,082 \cdot 10^4$

После произведенного расчета видно, что потери значительно отличаются во всех трех случаях. Учитывая потери, можно пересчитать коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия воздушного турбогенератора равен 98,15%, водородного турбогенератора равен 98,49%, турбогенератора с гелиевым охлаждением 98,32%. Расчетных формул для гелиевого охлаждения не найдено, вследствие чего приходится оперировать формулами опираясь на таблицу 1.

### ВЫВОД

Использование в качестве охлаждающей среды водорода позволяет снизить указанные выше потери почти в несколько раз и повысить КПД генератора. Мощность машины при переводе ее с воздушного на водородное охлаждение можно увеличить примерно на 20% при сохранении главных размеров.

Наибольшее распространение имеют турбогенераторы с воздушным и водородным

охлаждением, однако в связи с полученными результатами, имеет смысл рассмотреть турбогенератор с гелиевым охлаждением более подробно. Гелий охлаждает лучше, чем воздух, не взрывоопасен в отличие от водорода, а также из-за большей чем у водорода плотности - меньше утечки.

Косвенное водородное охлаждение целесообразно применять для турбогенераторов мощностью 30 – 100 МВт. Наибольшая реализованная мощность генератора с косвенным водородным охлаждением составляет 150 МВт. Для машин мощностью ниже 30 МВт затраты на специальное оборудование не оправдывают преимущества водородного охлаждения.

Косвенное гелиевое охлаждение целесообразно, применять в установках, где необходима высокая надежность и достаточно большие по мощности турбогенераторы. На данный момент двигатели с данным охлаждением применяются в ракетостроении.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ

### СПИСОК

1. Антонюк О.В. Турбогенераторы с воздушным охлаждением мощностью до 350 МВт/ О.В. Антонюк. ОАО «Силовые машины». С-Петербург. 2009 -4 с.
2. Антонюк О.В. Современная проблематика и перспективы развития газового охлаждения турбогенераторов/ О.В. Антонюк, Э.И. Гуревич, Т.Н. Карташова «Электрические станции». 2014.- №5. – с. 41-47
3. Антонюк О.В. Крупные отечественные генераторы для современной энергетики/ О.В. Антонюк, Э.И. Гуревич, В.Ю. Новожилов// Электрические станции, - 2015, - №2, – с. 53-62
4. Абрамов А.И Проектирование турбогенераторов. / А.И Абрамов, В.И. Извеков, Н.А. Серихин – М.: Высшая школа, 1990. – 336 с.