
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Научная статья

УДК 621.1; DOI: 10.61260/2304-0130-2023-4-29-34

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Лабинский Александр Юрьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Labinsciy@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности схемы охлаждения электрических машин, включая разомкнутую и замкнутую схемы охлаждения, а также схемы косвенного и непосредственного охлаждения. Приведены особенности расчета потери давления с последовательным и параллельным соединением участков тракта системы охлаждения и теплового расчета элементов системы охлаждения электрических машин, включая метод эквивалентных греющих потерь и метод тепловых схем замещения. Рассмотрены теплообменные аппараты системы охлаждения электрических машин, включая воздушные, газовые и водоводяные теплообменные аппараты, используемые в электрических машинах, а также масляные, масляно-воздушные и масляно-водяные теплообменные аппараты, используемые в трансформаторах. Приведена методика расчета суммарного теплового сопротивления теплообменного аппарата, входящего в состав системы охлаждения электрической машины. Рассмотрен пример оценки влияния коэффициента оребрения на величину коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата системы охлаждения электрической машины. С увеличением коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата увеличивается эффективность системы охлаждения, повышается надежность, и снижается риск выхода из строя электрической машины.

Ключевые слова: риск, надежность электрических машин, схема охлаждения, система охлаждения, потеря давления, тепловой расчет, теплообменный аппарат

Для цитирования: Лабинский А.Ю. Снижение рисков путем повышения надежности электрических машин // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2023. № 4. С. 29–34. DOI: 10.61260/2304-0130-2023-4-29-34.

Введение

Электрические машины (электродвигатели, генераторы, трансформаторы и т.п.) широко используются во всех отраслях промышленности. Выход из строя электрической машины связан с риском больших материальных потерь и может привести при определенных условиях к гибели людей. Поэтому тема статьи является актуальной.

Электрические машины, включая трансформаторы, являются весьма напряженными в тепловом отношении электромеханическими устройствами. Потери мощности, приводящие к нагреванию этих устройств, достигают 250 кВт/м^3 активного объема таких электрических машин. Такой нагрев требует создания эффективных систем охлаждения, обеспечивающих отвод тепла, при котором температура основных частей электрических машин не превышает допустимых предельных значений, составляющих от 50°C до 90°C .

В процессе длительной работы электрической машины или трансформатора возможны изменения режимов работы, в том числе повышение нагрузки, что влияет на температуру активных частей машины, от которой зависит срок службы (надежность) электрической машины. Многократные колебания температуры различных частей электрической машины влияют на механическую прочность и, в конечном счете, снижают срок службы всего оборудования.

В системах охлаждения электрических машин в качестве охлаждающей среды используются газы и жидкости. Охлаждающая среда, которая циркулирует под влиянием нагнетательных устройств (вентиляторов и насосов) по внутренним каналам электрической машины, образует совместно с внешними каналами тракта охлаждения и охладителями систему охлаждения электрической машины.

Принципы расчета теплообменных аппаратов, используемых в промышленности, включая системы охлаждения электрических машин, изложены в работах многих авторов [1–12]. Задача данного исследования произвести обзор схем охлаждения электрических машин с последовательным и параллельным соединением участков тракта системы охлаждения, а также методов расчета потери давления и методов теплового расчета элементов системы охлаждения электрических машин, включая метод эквивалентных греющих потерь и метод тепловых схем замещения. Тема статьи актуальна, так как совершенствование систем охлаждения электрических машин, входящих в состав энергоемких объектов, снижает техногенные риски выхода из строя дорогостоящего оборудования, уменьшает вероятность аварийных ситуаций и больших материальных и людских потерь.

Новизна исследования заключается в том, что в статье выполнена оценка влияния коэффициента шероховатости поверхности теплообмена на величину коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата системы охлаждения электрической машины. Зависимость значения коэффициента теплопередачи от значения коэффициента шероховатости представлена в наглядном графическом виде.

Особенности схемы охлаждения электрических машин

Большинство электрических машин имеют принудительную схему охлаждения, которая может быть двух типов [9]:

- разомкнутая схема охлаждения, при которой охлаждающая среда (воздух) забирается из окружающей среды, затем проходит через каналы тракта системы охлаждения и отводится снова в окружающую среду, передавая тепло окружающей среде;
- замкнутая схема охлаждения, при которой охлаждающая среда (газ, вода или хладагент) циркулирует по замкнутому контуру, забирает тепло от электрической машины и отдает тепло в специальном теплообменнике.

В зависимости от направления движения охлаждающей среды внутри электрической машины различают аксиальную, радиальную, смешанную и другие схемы охлаждения.

По способу отвода теплоты от выделяющих тепло элементов электрической машины различают схемы косвенного и непосредственного охлаждения [8].

В схеме косвенного охлаждения отвод тепла осуществляется непосредственно с открытых поверхностей активных частей электрической машины.

В схеме непосредственного охлаждения отвод тепла осуществляется в процессе циркуляции хладагента по специальным каналам внутри электрической машины.

На практике часто в качестве хладагента используют воду, которая обеспечивает необходимую эффективность охлаждения и является экономичным хладагентом.

Расчет потери давления в системе охлаждения электрических машин

Среди задач расчета потери давления можно назвать выбор схемы охлаждения, расчет потерь давления в отдельных каналах и полной потери давления во всем тракте системы охлаждения, выбор и расчет нагнетательных устройств (вентиляторов или насосов), обеспечивающих требуемый расход охладителя.

Любая система охлаждения может быть разбита на определенное число элементарных (условно однородных) участков, которые могут соединяться между собой последовательно или параллельно. Схема последовательного соединения элементарных участков представлена на рис. 1.

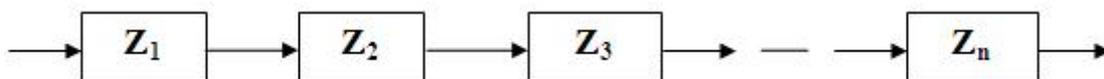


Рис.1. Схема последовательного соединения элементарных участков

Схема параллельного соединения элементарных участков представлена на рис. 2.

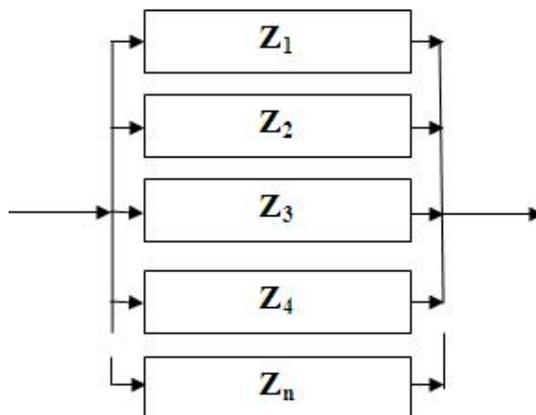


Рис. 2. Схема параллельного соединения элементарных участков

Перепад давления охладителя на отдельном элементарном участке может быть определен по следующей формуле [1, 7]:

$$\Delta p_i = Z_i * G_i^2,$$

где Δp_i – перепад давления на участке, Па; Z_i – сопротивление элементарного участка; G_i – массовый расход охладителя, кг/с.

Сопротивление элементарного участка может быть определено по следующей формуле [7]:

$$Z_i = \xi_i / (2 * \rho * F^2),$$

где ξ_i – коэффициент сопротивления участка; ρ – плотность охлаждающей среды, кг/м³; F – площадь сечения канала системы охлаждения, м².

При последовательном соединении элементарных участков системы охлаждения полный перепад давления будет равен:

$$\Delta P = \sum \Delta p_i = \sum (Z_i) * G^2,$$

где G – массовый расход охладителя, постоянный для всех участков.

При параллельном соединении элементарных участков системы охлаждения полный перепад давления будет равен:

$$\Delta P = \sum (Z_i * G_i^2),$$

где G_i – массовый расход охладителя для i -го участка.

Конечным результатом расчета потери давления в системе охлаждения является определение номинального перепада давления нагнетателя (насоса), обеспечивающего номинальный расход охлаждающей среды при расчетном суммарном сопротивлении всей схемы охлаждения.

Таким образом, главной задачей создания схемы охлаждения электрической машины является рациональное распределение охлаждающей среды по каналам системы охлаждения путем регулирования сопротивлений каналов с целью обеспечения равномерного отвода тепла от различных частей электрической машины на всем протяжении тракта системы охлаждения.

Тепловой расчет элементов системы охлаждения электрических машин

Для теплового расчета элементов системы охлаждения электрических машин на практике используются два метода [2, 4, 6]: метод эквивалентных греющих потерь (МЭГП) и метод тепловых схем замещения (МТСЗ).

МЭГП используется для определения средних значений превышения температуры в наиболее ответственных частях электрической машины. В этом случае тепловой расчет считается поверочным.

МТСЗ основан на аналогии тепловых и электрических потоков. В этом случае используется формула расчета теплообмена в твердом теле [6]:

$$Q = \lambda * \Delta t * F_{cp} / \delta,$$

где Q – количество тепла, Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м/К; δ – толщина слоя теплопередающей поверхности, м; Δt – перепад температуры по толщине слоя теплопередающей поверхности, К; F_{cp} – средняя площадь теплопередающей поверхности, м².

Сущность метода МТСЗ заключается в том, что все элементы электрической машины разбиваются на несколько однородных в тепловом отношении частей с источниками тепла или без них, связь между которыми учитывается соответствующими тепловыми сопротивлениями.

Коэффициенты теплоотдачи с поверхностями теплообмена определяются на основе модельных расчетов, по результатам которых определяются значения скоростей течения охлаждающей среды в каналах системы охлаждения электрической машины.

После определения тепловых сопротивлений по известным методикам расчета тепловых потоков составляется тепловая схема замещения. Таким образом, МТСЗ является математической моделью, позволяющей производить оценку тепловых полей как в отдельных частях системы охлаждения электрической машины, так и в целом во всей системе охлаждения.

Теплообменные аппараты системы охлаждения электрических машин

В электрических машинах с замкнутой схемой охлаждения теплота передается от теплоносителя внутреннего тракта охлаждения к теплоносителю внешнего тракта, который замыкается на теплообменный аппарат. Суммарное тепловое сопротивление теплообменного аппарата можно определить с помощью следующего соотношения [4]:

$$1/k_T = 1/(\alpha_1 * \varepsilon_p) + \delta/\lambda + 1/\alpha_2,$$

где k_T – коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата, Вт/м²/К; α_1 – коэффициент теплоотдачи от хладагента внутреннего тракта охлаждения к теплопередающей поверхности теплообменного аппарата, Вт/м²/К; ε_p – коэффициент оребрения (отношение величины наружной поверхности теплообменного аппарата к внутренней поверхности теплообменного аппарата); δ – толщина стенки теплопередающей поверхности теплообменного аппарата, м; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки теплопередающей поверхности теплообменного аппарата, Вт/м/К; α_2 – коэффициент теплоотдачи от теплопередающей поверхности теплообменного аппарата ко второму хладагенту, Вт/м²/К.

Приведенное соотношение показывает, что для уменьшения теплового сопротивления теплообменного аппарата следует увеличивать коэффициент оребрения и уменьшать толщину стенок теплопередающей поверхности теплообменного аппарата.

В электрических машинах используются воздушные, газовые и водоводяные теплообменные аппараты, а в трансформаторах – масляные, масляно-воздушные и масляно-водяные теплообменные аппараты. Для теплообменных аппаратов электрических машин скорость воздуха не превышает 4,5 м/с, а максимальная скорость воды составляет 2,0 м/с.

Примерные значения средних коэффициентов теплопередачи в теплообменных аппаратах различного типа представлены в таблице:

Таблица

Тип теплообменника	Тип теплообмениваемых сред	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² /К
Кожухотрубчатый	Газ-газ (P=1 атм)	5–35
Кожухотрубчатый	Жидкость-газ (P=1 атм)	15–70
Кожухотрубчатый	Жидкость-жидкость (P=1 атм)	150–1200
Пластинчатый	Вода-газ (P=1 атм)	20–60
Пластинчатый	Вода-жидкость (P=1 атм)	350–1200

Выполним оценку влияния коэффициента оребрения на величину коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата системы охлаждения электрической машины.

Исходные данные: коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 = 100$ Вт/м²/К; $\alpha_2 = 100$ Вт/м²/К; толщина стенки теплопередающей поверхности $\delta = 0,001$ м; коэффициент теплопроводности материала стенки (нержавеющая сталь) $\lambda = 17$ Вт/м/К, коэффициент оребрения $\varepsilon_p = 1,0$ – $2,0$. Результаты расчета в графическом виде представлены на рис. 3.

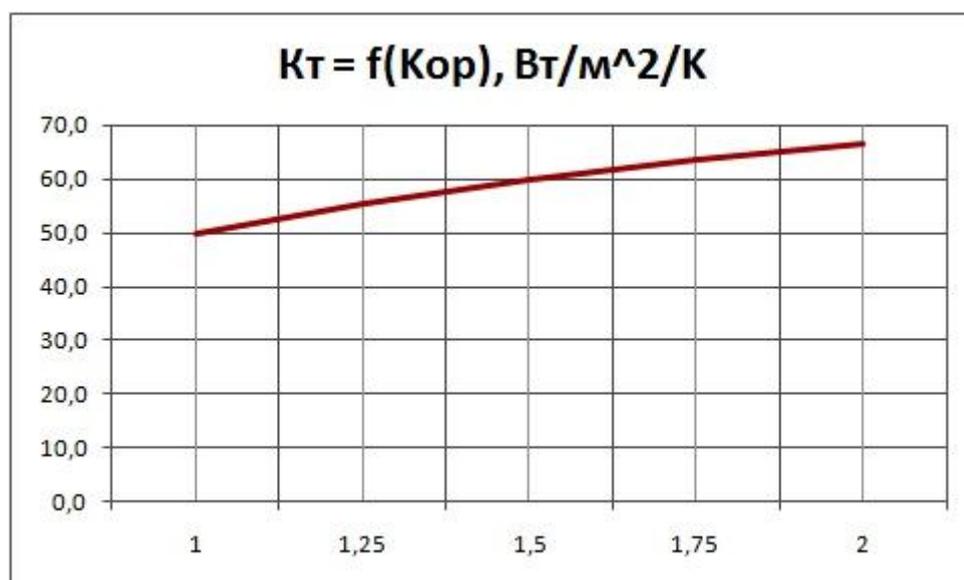


Рис. 3. Зависимость значения коэффициента теплопередачи от значения коэффициента оребрения

Как видно из рис. 3, при увеличении значения коэффициента оребрения от 1,0 до 2,0 значение коэффициента теплопередачи увеличивается от 50 до 68 Вт/м²/К.

Выводы

Рассмотрены особенности схемы охлаждения электрических машин, включая разомкнутую и замкнутую схемы охлаждения, а также схемы косвенного и непосредственного охлаждения. Рассмотрены особенности расчета потери давления с последовательным и параллельным соединением участков тракта системы охлаждения и теплового расчета элементов системы охлаждения электрических машин, включая метод эквивалентных греющих потерь и метод тепловых схем замещения.

Приведена методика расчета суммарного теплового сопротивления теплообменного аппарата, входящего в состав системы охлаждения электрической машины. Рассмотрен пример оценки влияния коэффициента оребрения на величину коэффициента теплопередачи

теплообменного аппарата системы охлаждения электрической машины. С увеличением коэффициента теплопередачи теплообменного аппарата увеличивается эффективность системы охлаждения, повышается надежность и снижается риск выхода из строя электрической машины.

Список источников

1. Волков В.Ю., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В. Моделирование теплогидравлических процессов в парогенераторе // Теплоэнергетика. 2022. № 2.
2. Белавина Е.А., Беляев И.А., Полонская О.М. Решение задачи конвективного теплообмена. // Теплоэнергетика. 2022. № 8.
3. Бойко Е.А., Вольнов В.Н., Сургутский Д.В. Имитационное моделирование процессов в паровых каналах // Теплоэнергетика. 2022. № 4.
4. Лычаков В.Д., Егоров М.Ю., Щеглов А.А. Анализ теплоотдачи теплообменных элементов // Теплоэнергетика. 2022. № 3.
5. Дерюгин В.В., Васильев В.Ф., Уляшева В.М. Тепломассообмен. М.: Лань, 2018.
6. Карелин Д.Л., Болдырев А.В., Гуреев В.М. Моделирование динамических процессов в парокompрессионной системе охлаждения // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Физико-математические науки. 2018. № 4. Т. 11.
7. Авдеев Е.А., Плетнев А.А., Булович С.В. Численный метод решения стационарной задачи теплогидравлики двухфазного потока в дисперсно-кольцевом режиме течения // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Физико-математические науки. 2018. № 3. Т. 11.
8. Золотонос Я.Д., Батуотдинова А.Г., Золотонос А.Я. Трубчатые теплообменники. Моделирование, расчет: монография. М.: Лань, 2018.
9. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. М.: Лань, 2013.
10. Jakob M. Heat Transfer. New York; London, 2016.
11. Eckert E., Drake R. Heat and Mass Transfer. London, 2015.
12. Spalding D., Taborek J. Heat Exchanger Design Handbook. New York; London, 2014.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 27.09.2023; принята к публикации: 15.11.2023

Информация об авторах:

Лабинский Александр Юрьевич, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Labinsciy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2735-4189>, SPIN-код: 8338-4230