

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОвого РАСЧЕТА ГИЛЬЗОВАННЫХ (ГЕРМЕТИЧНЫХ) ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

С.С. Скворцов, М.Е. Коварский
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрены особенности теплового расчета гильзованных (герметичных) приводов насосов специального назначения. Приведен расчет теплового состояния электрических машин с использованием методики тепловых схем замещения. Предлагаемая методика иллюстрируется тепловым расчетом привода герметичного насоса мощностью 60 кВт.

Ключевые слова: электрические машины, тепловой расчет.

Тепловой расчет электрической машины производится с целью определения температур её элементов конструкции при выбранной схеме охлаждения.

Технология проектирования электрической машины включает:

- предварительный (в большей степени интуитивный) выбор схемы охлаждения;
- выполнение предварительного теплового расчета с целью корректировки конструкции электромашины и/или её схемы охлаждения;
- и (при необходимости) проведение повторных тепловых расчетов с целью определения локальных перегревов частей проектируемой машины, которые не должны превышать предельно допустимых.

При этом учитываются следующие факторы:

- тип электрической машины (синхронная, асинхронная, постоянного тока или специального назначения), а также типы машин, предназначенные для работы в специфических условиях или помещениях;
- конструкцию электромашины и используемые в ней конструкционные материалы и их теплофизические свойства;
- используемый для её охлаждения теплоноситель (воздух, вода, масла, жидкие металлы и др.).

Эти разнообразные факторы нельзя учесть в рамках одной или двух стандартных схем теплового расчета.

Поэтому в литературе не содержится описание какого-либо одного типа теплового расчета, а содержатся рекомендации по применению того или иного метода расчета к машинам определенного типа.

Для этих целей наиболее удобным способом теплового расчета является метод тепловых схем замещения, традиционно используемых при расчетах теплового состояния электромашин.

В настоящее время в научно-производственном центре корабельного электромашиностроения (НПЦ КЭ) ВНИИЭМ разрабатываются синхронные электродвигатели, служащие приводами насосов (рис.1), у которых на валу роторов располагаются крыльчатки насосов, создающие необходимое давление в магистралях, проходящих частично через двигатели.

В одних случаях поток перекачиваемой среды проходит через отверстие в роторе, в других – через кольцевой канал, расположенный между внешней поверхностью статора и корпусом двигателя.

Во всех случаях охлаждающей средой для двигателей служит перекачиваемая среда – морская или дистиллированная вода или турбинное масло, частично забираемые для этих целей из магистрали при давлениях, создаваемых насосами.

Характерной особенностью этих двигателей является наличие тонкой цилиндрической гильзы, предотвращающей проникновение охлаждающей и перекачиваемой среды в полость, где располагается обмотка статора.

Такая же гильза изолирует полость ротора, где расположены постоянные магниты, создающие магнитный поток возбуждения, который взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора.

Эти гильзы на внутренней поверхности статора и роторе образуют кольцевой канал, через который частично проходит перекачиваемая среда.

Она же служит в этом случае и охлаждающей средой, снимающей греющие потери частично с обмотки статора и (полностью) с гильзы статора и, таким образом, эвакуируя большую часть греющих потерь, выделяющихся в двигателях.

Поскольку у авторов нет сведений о произведенных ранее расчетах теплового состояния подобных электродвигателей, возникает задача их теплового расчета.

В основе тепловых расчетов электрических машин лежит теория **теплопередачи**, основной задачей которой является расчет температурных полей. В различных частях электрических машин в процессе их работы формируется температурные поля, зависящие от условия выделения тепловой энергии в виде потерь и от условий отвода этой энергии из машины.

Процесс переноса теплоты в системе физических тел называется **теплообменом**. Теплообмен обусловлен характером температурного поля конкретной электромашин.

Различают три основных вида теплообмена: **теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен**.

Теплопроводность – это процесс передачи тепловой энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым как внутри самого тела, так и при его контакте с другими телами.

Конвекция – это теплоперенос путем перемещения некоторых объемов жидкости или газа из более нагретой области в менее нагретую. Различают естественную (свободную) и вынужденную конвекции. При вынужденной конвекции течение среды вызывается действием вентилятора, насоса и т. п. или движущимися частями самой машины.

Лучистый теплообмен – это преобразование внутренней энергии тела в энергию теплового излучения электромагнитных волн, которая затем поглощается другими телами.

В теплопередаче участвуют, как правило, все три вида теплообмена, но в конкретных условиях могут преобладать только один или два из них.

Рассмотрим более подробно основные из них – теплопроводность и вынужденную конвекцию.

Передача теплоты теплопроводностью происходит в направлении понижения температуры, поэтому вводится понятие **градиента**, т. е. вектора, выраженного через частные производные от функции распределения температуры в пространстве – $t(x, y, z)$ при стационарном поле температуры, и $t(x, y, z)$ – при нестационарном:

$$\text{grad}t = i \partial t / \partial x + j \partial t / \partial y + k \partial t / \partial z .$$

Направление передачи теплоты противоположно $\text{grad}t$, а количественная мера передачи теплоты пропорциональна $\text{grad}t$. Это обстоятельство легло в основу закона Фурье для теплопро-

водности: «... тепловая энергия dQ (Дж), проходящая через элемент поверхности площадью dS за промежуток времени $d\tau$ »:

$$dQ = -\lambda(\partial t / \partial n) dS d\tau . \quad (1)$$

Здесь введен параметр λ , это так называемый «коэффициент теплопроводности» (КТП), целиком зависящий от физических параметров вещества Вт/(м·град).

Для решения задач по определению температурного поля используют дифференциальное уравнение теплопроводности, которое выводится на основе закона сохранения энергии и закона Фурье (1). В общем виде (с учетом мощности потерь в единице объема P_0 (Вт/м³) для вещества, обладающего удельной теплоёмкостью C , Дж/(кг·град), и плотностью ρ , кг/м³, повышение энтальпии (теплосодержания) в объеме вещества за некоторый элементарный интервал времени τ приведет к повышению его температуры:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{P_0}{c\rho} . \quad (2)$$

Это уравнение называется дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных (ДУТП). Его в отдельных случаях возможно решать специальными численными методами (методом конечных разностей или методом конечных элементов), но для инженерных расчетов его редуцируют (упрощают). Так для одномерного поля температур без внутренних источников тепла уравнение (2) будет иметь вид

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 . \quad (3)$$

Однако для инженерных расчетов электрических машин прямое решение уравнений (2), (3) приводит к весьма сложным расчетам, требующим знание граничных и начальных условий, которые в большинстве случаев (особенно при предварительных расчетах) бывают неизвестными. Поэтому при тепловых расчетах электрических машин всю конструкцию машины разбивают

на отдельные элементы, в которых тепловые потоки считают постоянными.

Совокупность этих элементов называют «тепловой схемой замещения». Таким образом, тепловой расчет сводится к решению системы линейных уравнений, составленных по законам Кирхгофа для электрических цепей, поскольку существует полная аналогия законов теплопроводности и электропроводности. Этот метод даёт необходимую точность расчета (4 – 10%), удовлетворительную для практических целей.

В большинстве случаев на нагрев элементов электрических машин преобладающее влияние оказывают условия теплоотдачи с их поверхностей охлаждения.

Расчет теплового потока Q (Вт), т. е. тепловой энергии, отводимой за 1 с с некоторого участка поверхности площадью S (м^2), выполняют по формуле Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha S (t_{\text{п}} - t_{\text{ж}}),$$

где α – опытный коэффициент, называемый коэффициентом теплоотдачи (КТО); $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{ж}}$ – температуры соответствующей теплоотдающей поверхности и охлаждающей жидкой или газообразной сред.

Коэффициент α показывает, какая мощность (Вт) теплового потока отводится с 1 м^2 поверхности на 1° превышения температуры.

Наибольшая трудность при тепловом расчете электрических машин – определение α в каналах, где протекает охлаждающая среда, а в случае гильзованных двигателей и КТО в магистральных каналах, расположенных в самом двигателе, и необходимых для прокачки рабочей среды. Точность определения α в итоге определяет и точность нахождения распределения температур в самом двигателе.

Для нахождения коэффициентов теплоотдачи α необходимо, прежде всего, определить безразмерные критерии: Рейнольдса Re , Прандтля Pr и Нуссельта Nu для среды, используемой при охлаждении двигателя:

$$Re = V d_3 / \nu, \quad (4)$$

где V – скорость движения среды в канале, м/с; ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$; d_3 – эквивалентный диаметр канала, м;

$$Pr = \nu / a, \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Если $Re < 2300$, то режим течения будет ламинарным, при $Re > 10\,000$ – режим течения будет турбулентным.

Внутри этого диапазона режим течения будет переходным. Для каждого из этих трех диапазонов разные авторы [1, 2] предлагают различные формулы для определения критерия Nu , который и определяет значение α . Наиболее часто рекомендуемая формула [3]:

$$Nu = 0,024 Re^{0,8} Pr^{0,4}.$$

Она часто используется для расчетов в области турбулентного и частично переходного режимов течения.

Однако существуют и другие выражения для нахождения критерия Nu . Чаще всего это связано с найденной величиной критерия Re , а также с другими факторами, которые следует при этом учитывать (в частности величину Pr (5)).

При найденном критерии Nu :

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_3}, \quad (6)$$

где λ – теплопроводность охлаждающей среды, Вт/(м·град).

При тепловых расчетах используется понятие тепловое сопротивление – R_T (ТСП), зависящее от размеров и материала рассчитываемого теплопроводящего участка:

$$R_T = L / \lambda S. \quad (7)$$

Величина R_T аналогична понятию электрическое сопротивление. Это обстоятельство отражает уже упоминавшийся факт, что законы теплопроводности аналогичны законам электропроводности.

Влияние материала в (7) учитывает параметр $1/\lambda$, характеризующий удельное сопротивление материала процессу теплопроводности. Можно провести аналогию между тепловым потоком Q (Вт) и током I (А), между температурой t и элек-

трическим потенциалом Φ и т. д. На этом основании можно выразить закон Ома для тепловой цепи:

$$Q = \frac{t_2 - t_1}{R_T},$$

где $(t_2 - t_1)$ – разность температур в направлении теплового потока, °С; R_T – ТСП потоку тепла, град/Вт.

При описании тепловых схем замещения удобнее использовать величину, обратную тепловому сопротивлению, – тепловую проводимость:

$$\Lambda = 1/R_T, \text{ Вт/град.} \quad (8)$$

Если в тепловой схеме замещения тепловой поток распространяется в одном направлении, то суммируются ТСП. Если тепловой поток разветвляется на составляющие, суммируются тепловые проводимости.

При найденном α (6) ТСП потоку тепла от стенки канала охлаждения в поток теплоносителя:

$$R_T = 1/\alpha S, \quad (9)$$

где S – площадь поверхности теплоотдачи, м².

В случае гильзованного двигателя подобным же образом находится и КТО в магистрали для перекачиваемой среды, проходящей через двигатель. Перекачиваемую среду в этом случае можно рассматривать и как охлаждающую.

В гильзованном двигателе лобовые части обмотки статора находятся в замкнутом пространстве, где отсутствует поток охлаждающей среды. Поэтому при расчете ТСП потоку тепла от поверхности лобовых частей статора в окружающий их воздух (6) КТО принимался равным 15 Вт/(м²·град), рекомендованный в [3] для случая теплоотдачи от нагретого элемента конструкции в спокойный воздух.

В качестве примера теплового расчета гильзованного двигателя приведем результаты предварительного теплового расчета гильзованного электродвигателя мощностью 60 кВт, 3000 с⁻¹ с изоляцией, соответствующей классу Н по ГОСТ 15150 и допускающей длительную работу при температуре до 180 °С. Эскизный чертёж этого двигателя приведен на рис. 1, а его схема на рис. 2. Этому рисунку соответствует тепловая схема замещения, приведенная на рис. 3.

При расчете тепловых сопротивлений элементов конструкции электродвигателя $R(i)$, приведенных на рис. 2, использовалась формула (7), в которой величины L , S и λ принимались соответствующими для материала рассчитываемого участка. Затем по формуле (8) находились соответствующие им тепловые проводимости.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha(i)$ рассчитывались по формулам (4) – (6). Тепловые сопротивления потоку тепла от стенок каналов в теплоноситель по найденным $\alpha(i)$ определялись из выражения (9).

Следует отметить, что изложенный метод теплового расчета экспериментально проверен на ряде синхронных и асинхронных электродвигателей, разработанных в НПЦ КЭ.

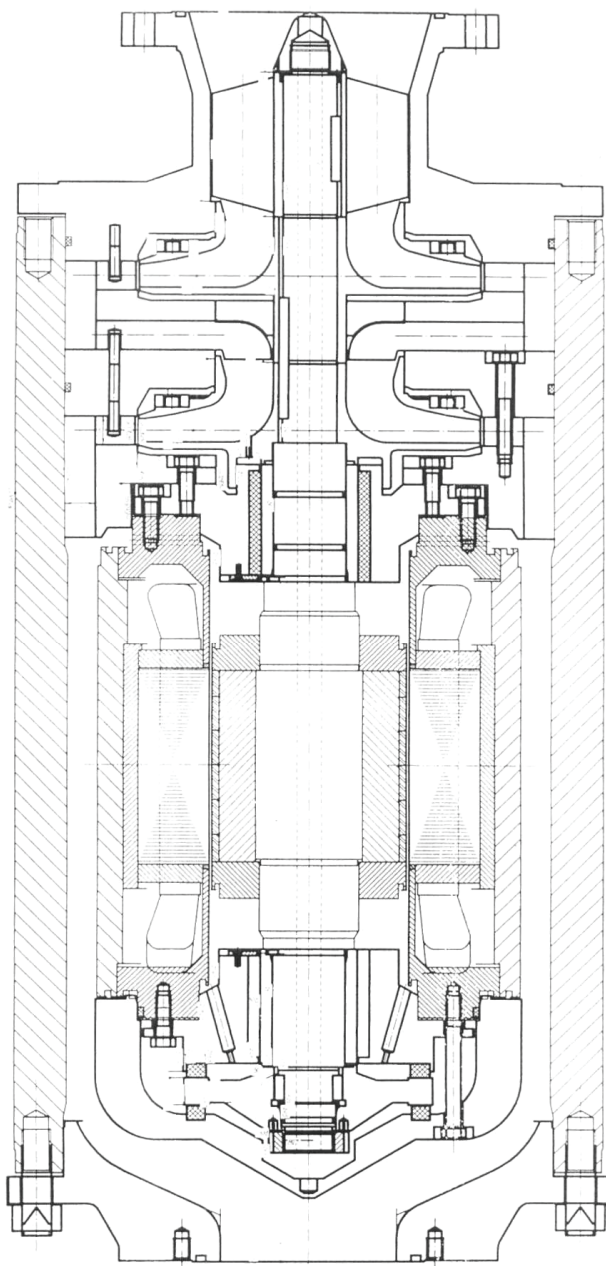


Рис. 1. Конструкция герметичного гильзованного привода насоса мощностью 60 кВт

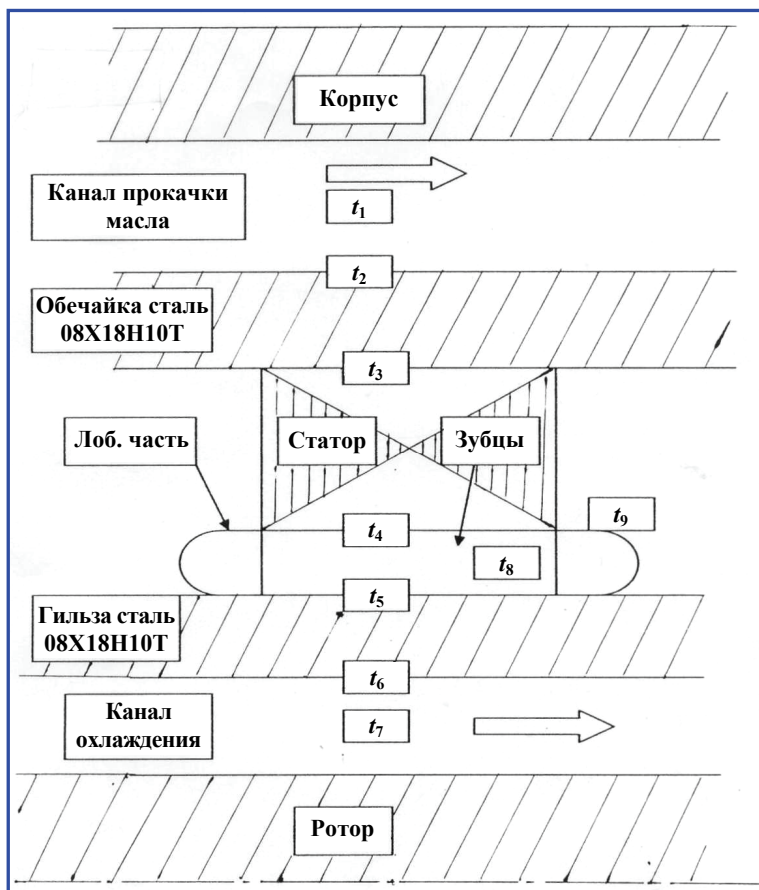


Рис. 2. Схема герметичного гильзованного привода мощностью 60 кВт

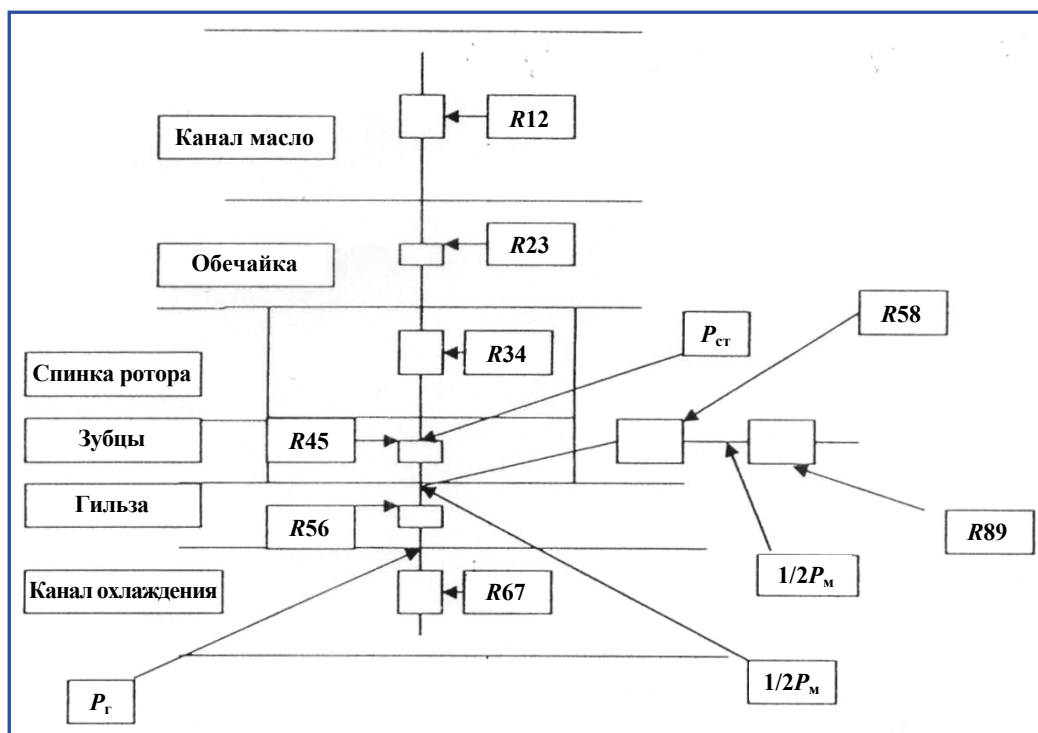


Рис. 3. Тепловая схема замещения герметичного гильзованного привода мощностью 60 кВт: $R(1 - 9)$ – тепловые сопротивления соответствующих участков схемы; $P_{ст}$ – тепловые потери в статоре; P_m – тепловые потери в меди; P_g – тепловые потери в гильзе статора

Тепловым сопротивлениям, обозначенным на схеме замещения (см. рис. 3) и найденным по выражению (7), соответствуют проводимости, найденные по формуле (9). Их значения приведены ниже (Вт/град):

$$\begin{aligned} \Lambda_{12} &= 614,0; \Lambda_{23} = 139,3; \\ \Lambda_{34} &= 424,1; \Lambda_{45} = 42,0; \\ \Lambda_{56} &= 5200,0; \Lambda_{67} = 234,0; \\ \Lambda_{58} &= 28,0; \Lambda_{89} = 4,0. \end{aligned}$$

Отдельно были рассчитаны величины греющих потерь в двигателе: $P_{ст} = 986$ Вт; $P_{м} = 2033$ Вт; $P_{г} = 5410$ Вт.

Для составления системы линейных уравнений, описывающих распределение температур в деталях электродвигателя, было использовано первое правило Кирхгофа (для узлов). После приведения подобных членов система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} 753t_2 - 614t_1 - 139t_3 &= 0; \\ 563t_3 - 139t_2 - 424t_4 &= 0; \\ 466t_4 - 424t_3 - 42t_5 &= 986; \\ 5270t_5 - 42t_4 - 28t_8 - 5200t_6 &= 1015; \\ 5434t_6 - 5200t_5 - 234t_7 &= 5410; \\ 32t_8 - 28t_5 - 4t_9 &= 1015; \\ 4t_9 - 4t_8 &= 0; \\ t_7 &= 5; \\ t_1 &= 0. \end{aligned}$$

Поскольку температура перекачиваемой среды принята $t_1 = 0$, температуры элементов электродвигателя $t_2 - t_9$, найденные из решения системы урав-

нений, следует рассматривать как превышения соответствующих температур над температурой перекачиваемой среды (максимальная температура среды – рабочего тела – 50°C). Решение системы уравнений дает следующие превышения температур элементов электродвигателя в $^\circ\text{C}$ (см. рис. 2): $t_2 = 2,68$ – температура стенки канала для прокачки среды; $t_3 = 14,5$ – температура внешней поверхности статора; $t_4 = 18,4$ – температура спинки статора в области зуба; $t_5 = 34,2$ – температура в месте касания гильзы и зуба; $t_6 = 33,9$ – температура поверхности гильзы; $t_8 = 70,5$ – температура меди обмотки статора; $t_9 = 70,5$ – температура поверхности лобовых частей статора; $t_7 = 5,0$ – заданное превышение температуры среды в канале охлаждения.

Проведенное исследование теплового состояния разработанной конструкции гильзованного двигателя мощностью 60 кВт, используемого как привод насоса, показывает, что температуры элементов его конструкции не превышают допустимые рабочие температуры для изоляции класса Н, и таким образом гарантируют его длительную и надежную работу.

Литература

1. Сергеев П.С. Проектирование электрических машин / Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов, П.С. Сергеев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1969. – 632 с. : ил., формы.
2. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович [и др.]. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
3. Электротехнический справочник. В 3 т. / под ред. Герасимова. – М.: Энергия, 1971.

Поступила в редакцию 08.09.2009

Станислав Сергеевич Скворцов, канд. физ.-мат. наук, нач. лаборатории, т. 365-26-14.
Михаил Ефимович Коварский, канд. техн. наук, начальник НПЦ КЭ, т. 8-903-964-92-12.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.