

Термометрический метод определения потерь мощности при физическом моделировании энергетических процессов в турбо- и гидрогенераторах

ГУРЕВИЧ Э.И.

Предложен и обоснован лабораторный метод определения суммарных потерь в электрической машине или ее физической модели. По существу метод представляет собой динамическую модификацию известного калориметрического метода определения потерь в электрических машинах. Сравнительные достоинства предлагаемого метода (в первую очередь сокращение продолжительности испытания) в большей мере проявляются при исследованиях крупномасштабных физических моделей.

Ключевые слова: электрическая машина, физическая модель, потери, регулярный тепловой режим, измерение температуры

Физическое моделирование в электромашиностроении играет все более важную роль, позволяя решать ответственную задачу экспериментальной поддержки при создании новых конструкций. В число конкретных задач, решаемых посредством физического моделирования, входит исследование потерь мощности при работе электрических машин, в первую очередь турбо- и гидрогенераторов. В частности, для крупных генераторов с воздушным охлаждением важен вопрос о вентиляционных потерях как существенной составляющей суммарных потерь; надежное его решение требует, по меньшей мере, физического моделирования, а в особо ответственных случаях – полномасштабного эксперимента [1, 2].

Кроме того, в последнее время практика проявляет повышенный интерес к энергетическим процессам, протекающим в активной зоне электрических машин специального назначения. К таким машинам относятся, например, обратимые гидрогенераторы (асинхронизированные синхронные машины в составе гидроаккумулирующих энергоблоков), и здесь речь идет уже о потерях не столько механических, сколько электромагнитных. Малоизученность ряда соответствующих проектных вопросов побуждает к их постановке на уровне физического моделирования. При этом достоверное измерение и разделение потерь становится важным частным разделом модельного эксперимента.

Сумму потерь, выделяющихся в пределах рабочей зоны крупной электрической машины, обычно

A laboratory method for determining the total losses in an electrical machine or in its physical model is proposed and substantiated. The proposed method is essentially a dynamic version of the well-known calorimetric method for determining losses in electrical machines. The comparative advantages of the proposed method (primarily a shorter period of time required for carrying out the test) show themselves to a larger degree in studies of large-scale physical models.

Key words: electrical machine, physical model, losses, thermal operating conditions, temperature measurements

определяют с помощью калориметрического метода, базирующегося на измерениях расхода и нагрева охлаждающей среды в установившемся тепловом состоянии [3]. Это связано с продолжительным (как правило, многочасовым) ожиданием такого состояния при обязательном и строгом поддержании заданных значений параметров тепловыделения и отвода тепла. При этом нелегко обеспечить точность непосредственного измерения двух неэлектрических величин – расхода теплоносителя и характерно малых разностей его температуры, а также с надлежащей корректностью учесть неизбежные тепловые утечки из основного охлаждающего контура [4].

Если подчинить модельный эксперимент вышеупомянутым правилам и ограничениям, действующим при испытании готовых машин, можно прийти к необходимости выполнения весьма продолжительных экспериментальных процедур, обремененных едва ли не прецизионными измерениями температур и расходов теплоносителей. Это привело бы к значительным затратам труда и времени на проведение и обеспечение достоверности большого числа опытов, необходимых обычно при физическом моделировании в условиях широкого варьирования параметров конструкции и режима. Именно данная специфика модельного эксперимента побуждает к корректировке методического принципа, на котором можно строить суждение о суммарном тепловыделении в опытной установке.

Идея метода. Излагаемый здесь метод в отличие от калориметрического основан на текущих темпе-

ратурных измерениях в произвольной области модели при динамическом тепловом состоянии объекта. Он реализуется по достижении регулярного режима [5], характеризуемого неизменной и одинаковой для всех элементов системы скоростью нарастания температуры при постоянной производительности источников тепла и отсутствии значимого теплообмена объекта с окружающей средой (для выполнения последнего условия применяется эффективная тепловая изоляция рабочей зоны модели от окружающего воздуха). При этом для повышения точности результата в контур циркуляции охлаждающей среды вводится дополнительный источник тепла – электронагреватель, мощность которого нужно поддерживать постоянной и измерять электрическими приборами.

Теория метода основывается на анализе нестационарного теплообмена в замкнутых циклах циркуляции теплоносителя при наличии нескольких источников тепла [6]. Исключение из системы всех стоков тепла оставляет за теплоносителем единственную физически важную функцию: осуществление конвективной связи между отдельными источниками, что приводит к выравниванию темпа нагревания в пределах всей системы. Условия теплового баланса для любого момента времени применительно к системе из трех высокотеплопроводных тел (ротор 1, статор 2 и дополнительный электронагреватель 3) выражаются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} P_1 &= c_1 G_1 \frac{dQ_1}{dt} + a_1 F_1 \frac{\partial Q_1}{\partial t} - \frac{J_1 + J_2}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \\ a_1 F_1 \frac{\partial Q_1}{\partial t} - \frac{J_1 + J_2}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} &= c_0 Q (J_2 - J_1); \\ P_2 &= c_2 G_2 \frac{dQ_2}{dt} + a_2 F_2 \frac{\partial Q_2}{\partial t} - \frac{J_2 + J_3}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \\ a_2 F_2 \frac{\partial Q_2}{\partial t} - \frac{J_2 + J_3}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} &= c_0 Q (J_3 - J_2); \\ P_3 &= c_3 G_3 \frac{dQ_3}{dt} + a_3 F_3 \frac{\partial Q_3}{\partial t} - \frac{J_1 + J_3}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \\ a_3 F_3 \frac{\partial Q_3}{\partial t} - \frac{J_1 + J_3}{2} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} &= c_0 Q (J_1 - J_3), \end{aligned} \quad (1)$$

где c_0 – удельная теплоемкость охлаждающей среды; c_1, c_2, c_3 – удельная теплоемкость тел 1, 2, 3; G_1, G_2, G_3 – их масса; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты теплоотдачи; F_1, F_2, F_3 – теплоотдающие поверхности; $Q = V / t_0$ – расход среды; V – объем камеры; t_0 – время обращения одного цикла; P_1, P_2, P_3 – потери в телах 1, 2, 3.

Обращаясь к теплофизическим свойствам реальных конструктивных узлов, представляющих собой композиции разнородных тел, будем опериро-

вать интегральными параметрами этих узлов – приведенными теплоемкостями C , эквивалентными тепловыми сопротивлениями R и собственными показателями термической инерции T :

$$\begin{aligned} C_1 &= \dot{a} \sum_{i=1}^{N_1} c_i G_i; \quad C_2 = \dot{a} \sum_{k=1}^{N_2} c_k G_k; \quad C_3 = \dot{a} \sum_{j=1}^{N_3} c_j G_j; \\ R_{12} &= \frac{1}{\dot{a} a_1 (F_1) dF_1} + \frac{1}{\dot{a} a_2 (F_2) dF_2}; \\ R_{23} &= \frac{1}{\dot{a} a_2 (F_2) dF_2} + \frac{1}{\dot{a} a_3 (F_3) dF_3}; \\ R_{31} &= \frac{1}{\dot{a} a_1 (F_1) dF_1} + \frac{1}{\dot{a} a_3 (F_3) dF_3}; \\ T_1 &= C_1 R_{12}; \quad T_2 = C_2 R_{12}; \quad T_3 = C_3 R_{31}. \end{aligned} \quad (2)$$

В общем случае система уравнений подлежит решению при начальных условиях, соответствующих тепловому равновесию системы с окружающей средой $Q_1(0) = 0; Q_2(0) = 0; Q_3(0) = 0$, и при непрерывном действии всех трех источников тепла P_1, P_2, P_3 с постоянной их производительностью во времени. В частных случаях возможны условия $P_2 = 0$ и $P_3 = 0$, которые будут охарактеризованы ниже при описании экспериментальной процедуры.

При неограниченном времени действия источников система стремится к квазистационарному тепловому состоянию, характеризуемому постоянной скоростью нарастания температуры в любом элементе системы, а более конкретно, и в любой ее точке:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} = B = \text{const.}$$

Это означает, что отсчеты показаний температурных датчиков, встроенных в различных областях одного из тел системы (скажем, в произвольные точки с координатами x_i, y_i, z_i или x_k, y_k, z_k), подчиняются условиям:

$$\frac{\partial Q(x_i, y_i, z_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial Q(x_k, y_k, z_k, t)}{\partial t} = \dots = B = \text{const.} \quad (3)$$

Применительно к нашей задаче обсуждаемый темп нарастания температуры всех точек объекта (физической модели, состоящей из трех активных тел в замкнутом потоке теплоносителя) в регулярном режиме будет одним и тем же:

$$B = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{C_1 + C_2 + C_3}. \quad (4)$$

Понятно, что температура произвольной точки системы в указанном режиме приобретает в любой

момент времени собственное значение, которое отличается от температуры иных точек лишь постоянной составляющей A_i :

$$Q_i(x_i, y_i, z_i, t) = A_i(x_i, y_i, z_i) + Bt. \quad (5)$$

Содержание эксперимента. Поскольку согласно (4) скорость нарастания измеряемых температур в регулярном режиме прямо пропорциональна сумме потерь в объекте и обратно пропорциональна суммарной приведенной теплоемкости, то в принципе можно было бы определить искомую величину потерь на основании подсчета массы и удельной теплоемкости элементов конструкции модели. Однако для повышения точности лучше калибровать искомую величину посредством температурных измерений. Для этого и введен в систему дополнительный активный элемент – электронагреватель, мощность которого P_3 измеряется непосредственно.

Теперь достаточно записать опытные температурно-временные зависимости хотя бы в одной точке статора (тело 2) при двух состояниях системы (рис. 1). В первом из них (кривая a) источниками тепла являются ротор и статор, нагреватель отключен; во втором (кривая b) нагреватель включен, так что известная его мощность (P_3) присоединяется к потерям ($P_1 + P_2$), выделяющимся в двух изначально действующих источниках. Эти искомые потери в регулярной стадии связаны с известной мощностью P_3 зависимостью

$$P_1 + P_2 = P_3 \frac{\frac{dQ_{2\text{reg}(a)}}{dt}}{\frac{dQ_{2\text{reg}(b)}}{dt} - \frac{dQ_{2\text{reg}(a)}}{dt}} = P_3 \frac{\text{tg } \varphi_b}{\text{tg } \varphi_b - \text{tg } \varphi_a}. \quad (6)$$

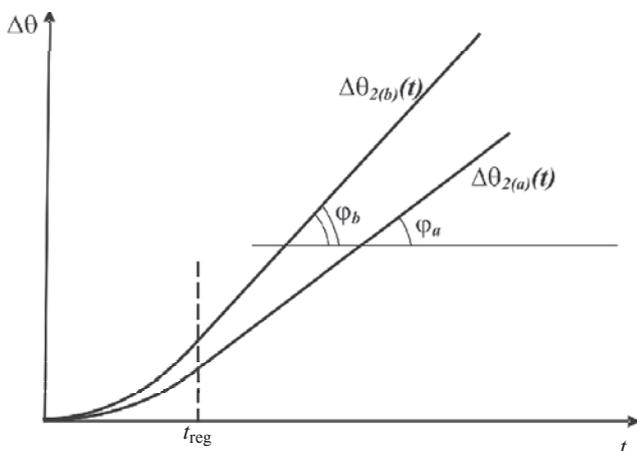


Рис. 1. Кривые нагрева произвольной точки статора при выполнении независимых опытов из состояния теплового равновесия с выключенным (индекс a) и включенным (b) электронагревателем

Продолжительность опыта. Дадим априорную оценку отрезка времени t^* , на протяжении которого скорость нарастания измеряемой температуры приобретает значение, практически неотличимое от асимптотического (при $t \gg \tau$).

Для ясности анализа предельно упростим модель теплового процесса. Во-первых, в силу естественных соотношений $c_3 G_3 \ll c_1 G_1$ и $c_3 G_3 \ll c_2 G_2$ (масса электронагревателя на два порядка меньше массы ротора или статора при мало различимых уровнях удельной теплоемкости материалов) положим $c_3 G_3 = 0$. Во-вторых, объединим нагреватель и ротор в одном только теле 2 на основе допущения о пренебрежимо малой инерционности реального процесса передачи тепла между двумя этими звеньями. Данное допущение является достаточно строгим лишь в отношении теплового потока от нагревателя к воздуху ввиду малой тепловой инерции нагревателя. Однако последующий прием ротором тепловой энергии от нагретого воздуха определяется уже теплоинерционными свойствами самого ротора, а именно, его приведенной теплоемкостью, так что темп восприятия тепла ротором от воздуха уже не на порядок, а всего в 2–3 раза больше темпа передачи тепла от ротора к статору. Это снижает точность конечного результата примерно на 10%, что вполне приемлемо для оценки искомой продолжительности опыта.

В итоге приходим к модели термической связи двух тел – ротора и статора – при посредстве теплового сопротивления $R_{12} = R$, вычисляемого согласно (2):

$$R_{12} = R \frac{1}{\frac{\partial a_1(F_1)}{\partial F_1}} + \frac{1}{\frac{\partial a_2(F_2)}{\partial F_2}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i F_i}{a_i}} + \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{a_j F_j}{a_j}},$$

где a_1, a_2 – коэффициенты теплоотдачи ротора и статора; F_1, F_2 – площади теплоотдающих поверхностей ротора и статора.

Принятые допущения дают возможность рассматривать тепловой процесс с помощью системы из двух уравнений:

$$P_1 R = T_1 \frac{dQ_1}{dt} + Q_1 - Q_2; \quad P_2 R = T_2 \frac{dQ_2}{dt} - Q_1 + Q_2,$$

решение которой при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$Q_1(t) = Mt + k(1 - e^{-t/T_E}); \quad (7)$$

$$Q_2(t) = Mt - \frac{k}{S}(1 - e^{-t/T_E}), \quad (8)$$

где $M = \frac{P_1 + P_2}{C_1 + C_2}$; $k = \frac{s^2 R \varnothing P_1}{(1+s)^2 \varnothing P_1} - \frac{P_2 \ddot{\varnothing}}{s \ddot{\varnothing}}$; $s = \frac{C_2}{C_1}$;
 $T_{1,2} = C_{1,2} R$; $T_E = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$.

Свяжем вопрос о времени t^* практического достижения регулярного режима с допустимой относительной ошибкой измерения потерь dP , которая обусловлена разностью двух значений производной опытной кривой нагрева $Q_2(t)$ в идеальных условиях (при $t \in \mathbb{R}$) и в искомый момент времени t^* :

$$dP = \frac{1}{M} \left| \frac{dQ_2(\mathbb{R})}{dt} - \frac{dQ_2(t^*)}{dt} \right| = \frac{k}{sMT_E} e^{-t^*/T_E},$$

откуда

$$t^* = T_E \ln \frac{1}{\epsilon} \frac{C_2 / C_1 - P_2 / P_1}{C_2 / C_1 (1 + P_2 / P_1)} \quad (9)$$

Из (9) следует, что наибольшая продолжительность иррегулярной стадии процесса соответствует условию $P_2 = 0$ (опыт по исследованию вентиляционных потерь). Для практической оценки t^* можно ориентироваться на допустимое в 1% рассогласование ($dP = 0,01$), в результате чего получим:

$$t^* = T_E \ln 100 = 4,6 T_E.$$

Например, при $T_1 = T_2 = 0,5$ ч, $T_E = 0,25$ ч значение $t^* = 4,6 T_E = 1,2$ ч.

Заметим, что в практически реализуемых физических моделях для электромагнитных исследований по конструктивным соображениям соотношение $C_2 > C_1$ при $P_2 < P_1$, поэтому, как видно из (9), при измерениях электромагнитных потерь продолжительность обсуждаемой стадии ожидания оказывается заметно меньше, чем при измерении вентиляционных потерь.

Частный случай $P_2 = 0$: измерение вентиляционных потерь. Для определения вентиляционных потерь $P_{\text{вент}}$ в модели нужно сравнить наклоны двух опытных зависимостей $Q_{2(a)}(t)$ и $Q_{2(b)}(t)$ (см. рис. 1) и вычислить значение $P_{\text{вент}}$, подставляемое в (6) вместо $P_1 + P_2$. Для этого требуются два опыта с вращением невозбужденного ротора. лучше всего проводить каждый опыт из состояния теплового равновесия, т.е. при нулевых начальных условиях: а) $DQ_{1(a)}(0) = 0$; $DQ_{2(a)}(0) = 0$; $DQ_{3(a)}(0) = 0$; б) $DQ_{1(b)}(0) = 0$; $DQ_{2(b)}(0) = 0$; $DQ_{3(b)}(0) = 0$.

Однако на практике может оказаться привлекательным проводить опыты один за другим в той или иной последовательности (см. рис. 2), что вносит в результат ошибку, обусловленную влиянием

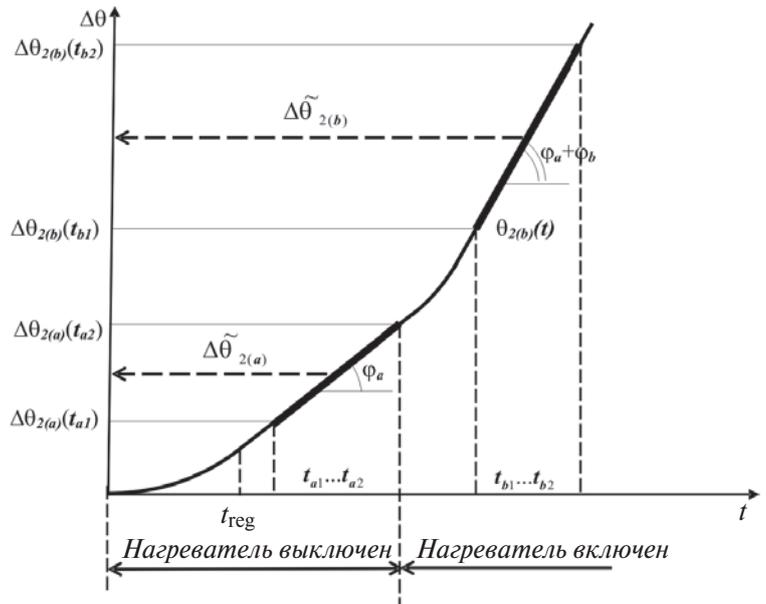


Рис. 2. Температурно-временная зависимость при последовательном выполнении опытов с выключенным (индекс а) и включенным (b) электронагревателем

температуры воздуха J на $P_{\text{вент}}$ (искомые потери пропорциональны плотности воздуха ρ_0 , которая, в свою очередь, зависит от температуры):

$$\frac{P_{\text{вент}}(J_1)}{P_{\text{вент}}(J_2)} = \frac{\rho_0(J_1)}{\rho_0(J_2)} = \frac{273 + J_2}{273 + J_1}.$$

Вышеупомянутую ошибку можно скомпенсировать расчетной поправкой:

$$\frac{P_{\text{вент}(b)}(J_b)}{P_{\text{вент}(a)}(J_a)} = k_J \frac{P_{\text{вент}(b)}(J_a)}{P_{\text{вент}(a)}(J_a)};$$

$$k_J = 1 - D_J = \frac{\rho_0(J_b)}{\rho_0(J_a)} = \frac{273 + J_a}{273 + J_b};$$

$$D_J = \frac{[Q_{2(b)}(0) - Q_{2(a)}(0)] + [D\tilde{Q}_{2(b)} - D\tilde{Q}_{2(a)}]}{273 + Q_{2(b)}(0) + D\tilde{Q}_{2(b)}};$$

$$D\tilde{Q}_{2(a,b)} = \frac{Q_{2(a,b)}(t_{1(a,b)}) + Q_{2(a,b)}(t_{1(a,b)})}{2}.$$

Измерение и разделение электромагнитных потерь. В этом отношении по своим возможностям данный динамический метод мало отличается от обычного калориметрического, поскольку в обоих случаях измеряемой величиной является сумма всех потерь, выделяющихся в данном опыте внутри объекта. Поэтому остается правомерной суперпозиция отдельных потерь, позволяющая отделять сумму потерь холостого хода или короткого замыкания от механических потерь, а на следующем этапе разделять потери короткого замыкания на основные (омические) и дополнительные [7].

В силу своеобразия условий данного эксперимента приходится проявлять повышенное внимание к термической безопасности элементов конструкции, если их стационарный нагрев уже при нормальных условиях охлаждения приближается к критическому. Понятно, что в режиме без охлаждения опасный уровень температуры может наступить раньше, чем температурно-временная зависимость выйдет на прямолинейный (квазистационарный) участок, требуемый для реализации процедуры измерения потерь. В основном это касается ротора.

Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 3, где кривая нагрева наиболее нагретой точки обмотки ротора достигает предельно допустимой температуры $Q_{\text{пред}}$ задолго до наступления регулярного режима. Заметим, что так может обстоять дело при непосредственной нагрузке, близкой к номинальной, тогда как в косвенных режимах нагрузки (холостой ход, короткое замыкание) ресурс по нагреву в виде разности температур ($Q_{\text{пред}} - Q_{\text{у.косв}}$) обычно является значительным. Следовательно, на практике при определении отдельных потерь в таких режимах фактически не остается препятствий для применения обсуждаемого метода.

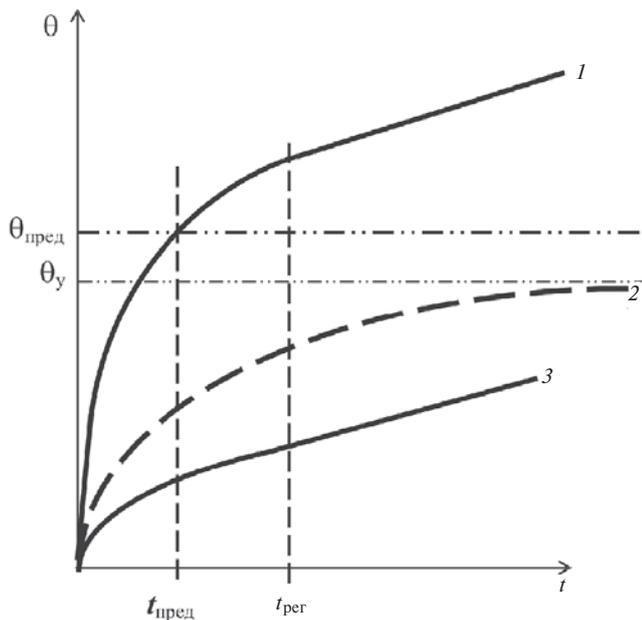


Рис. 3. Кривые нагрева ротора при различных состояниях системы охлаждения: 1 – избыточная температура наиболее нагретой точки обмотки ротора в режиме без охлаждения; 2 – превышение температуры этой же точки при нормальном охлаждении; 3 – избыточная среднеобъемная температура ротора в режиме без охлаждения

Оценка тепловых утечек. Обсуждаемый термометрический метод определения потерь предполагает надежную теплоизоляцию рабочей зоны физической модели, например в виде пенопластового покрытия, монтируемого на всех внутренних граничных поверхностях либо на наружной поверхно-

сти модели. Толщина теплоизолирующего покрытия должна быть не менее 50 мм. Здесь дана приближенная оценка теплового потока на протяжении опыта, продолжительность которого принята равной 0,5 ч (такой интервал с запасом охватывает время надежной регистрации измерительной информации в регулярном режиме). В пределах указанного промежутка времени в силу специфики процесса теплопередачи в среде с чрезвычайно низкой теплопроводностью можно рассматривать изолирующую пластину как полупространство. Для указанных условий удельный тепловой поток, проникающий от нагретого воздуха внутрь изоляционного слоя, будет изменяться во времени по закону [4]:

$$q(t) = (J_{\text{вн}} - Q_0) \sqrt{1/\rho c} \frac{1}{\sqrt{pt}} \text{ Вт/м}^2.$$

Для пенополистирола $l = 0,04 \text{ Вт/м}^2\text{Ж}$; $\rho c = 27 \text{ кДж/м}^3\text{Ж}$.

Средняя плотность теплового потока на временном интервале 1800 с ($t = 1800/2 = 900 \text{ с}$):

$$q(t) = (J_{\text{вн}} - Q_0) \sqrt{0,04 \cdot 27000} \frac{1}{\sqrt{900\rho}} = 0,62 DQ_{\text{ср}}, \text{ Вт/м}^2.$$

При $DQ_{\text{ср}} \approx 30$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $F_{\text{и}} \approx 10 \text{ м}^2$ общая утечка тепла из модели будет не более 0,25 кВт. Это вполне приемлемо, так как составляет около 1% ожидаемого значения измеряемых потерь.

Характерные особенности экспериментальной процедуры. Специфическим требованием к эксперименту является постоянство тепловыделения и условий передачи тепла от источников к первичному теплоносителю (охлаждающему воздуху) на всем протяжении опыта, особенно на завершающей его стадии. Для этого в опыте строго поддерживается постоянная частота вращения, которая, как и значения мощности приводного двигателя и вспомогательного нагревателя, подлежит непрерывному измерению. В интересах точности мощность вспомогательного электронагревателя должна составлять не менее половины ожидаемого значения измеряемых потерь. Предпочтительное исходное состояние модели перед опытом – тепловое равновесие. Наилучшим видом температурных датчиков являются платиновые термометры сопротивления, монтируемые в пазах статора. Опрос датчиков проводится не реже одного раза в минуту по каждому каналу. Разрешающая способность датчиков температуры должна быть не хуже $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Независимость результата операции дифференцирования опытных температурно-временных зависимостей от постоянных составляющих систематической погрешности дает возможность сосредото-

точиться лишь на двух показателях качества средств измерения – разрешающей способности и помехозащищенности. Фактически появляется свобода выбора местоположения датчиков, ограничиваемая лишь опасностью значимых паразитных электрических воздействий на измерительный сигнал. Число датчиков может быть сведено к минимуму из простых соображений дублирования точек отсчета. Наконец, важная почти при всяком опытном изучении нестационарных температур тепловая инерционность термодатчика в данном виде измерений утрачивает значение, поскольку запаздывание измерительного сигнала никак не сказывается на значении производной опытной температурно-временной зависимости.

Приложение. Априорный расчет кривых нагрева ротора и статора полномасштабной физической модели неявнополюсной синхронной машины (обратимого гидрогенератора). Необходимые для расчета сведения о приведенных теплоемкостях элементов конструкции модели, общий вид которой показан на рис. 4, представлены в таблице. Здесь же приведены расчетные параметры конвективного теплообмена применительно к опытам при различной частоте вращения ротора.

Конструктивный узел	Параметры			
	$c_i G_i \cdot 10^{-6}$ Дж/К	$a_i F_i$, Вт/К, при n , об/мин		
		180	300	420
Ротор				
Втулка	7,80	132	198	260
Спицы	2,57	316	476	623
Ярмо	6,07	1005	1513	1980
Зубцы	2,04	903	1358	1778
Обмотка	2,06	220	332	434
Сумма	20,5	2576	3877	5075
Статор				
Зубцы	2,16	1290	1940	2540
Ярмо	5,75	1486	2237	2928
Обмотка	1,78	149	224	293
Торцевые щиты	0,42	190	286	375
Корпус статора	1,59	289	435	570
Сумма	11,7	3404	5112	6706

На основании этих данных вычислены для каждой частоты вращения соответствующие показатели термической инерции (постоянные времени нагрева в иррегулярной стадии) ротора T_1 (при $n=180, 300$ и 420 об/мин значения $T_1 = 14010$ с (3,89 ч), 9317 с (2,59 ч) и 7110 с (1,97 ч)) и статора T_2 (при $n=180, 300$ и 420 об/мин значения $T_2 = 7978$ с (2,22 ч), 5306 с (1,47 ч) и 4050 с (1,12 ч)). Для расчета кривых на-

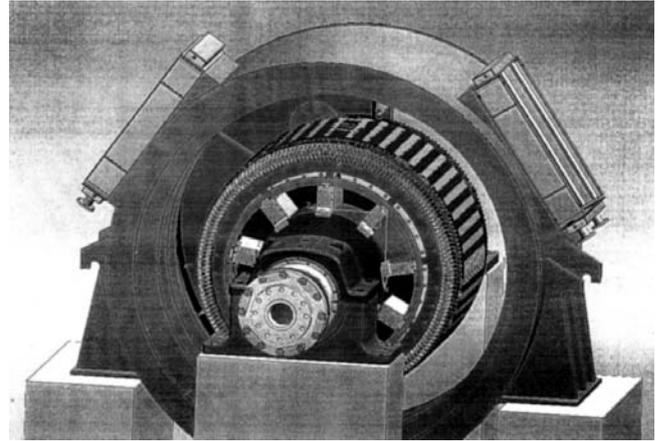


Рис. 4. Общий вид крупномасштабной модели обратимого гидрогенератора

грева, кроме представленной информации, требуются сведения об ожидаемых потерях в роторе P_1 и статоре P_2 . Положим, что опыт при частоте вращения 420 об/мин направлен на определение вентиляционных потерь, ожидаемое значение которых $P_1 = 50$ кВт, $P_2 = 0$. Назначим мощность электронагревателя $P_3 = 25$ кВт.

Скорость нарастания температуры в регулярном режиме без нагревателя (M_0) и с нагревателем (M_H):

$$M_0 = \frac{P_1}{c_1 G_1 + c_2 G_2} = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 3600}{(20,5 + 11,7) \cdot 10^6} = 5,59 \text{ К/с};$$

$$M_H = \frac{P_1 + P_3}{c_1 G_1 + c_2 G_2} = \frac{(50 + 25) \cdot 10^3 \cdot 3600}{(20,5 + 11,7) \cdot 10^6} = 8,38 \text{ К/с}.$$

Значение эквивалентной постоянной времени T_E при $n = 420$ об/мин

$$T_E = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} = \frac{1,97 \cdot 1,12}{1,97 + 1,12} = 0,71 \text{ с}.$$

$\Delta\theta$

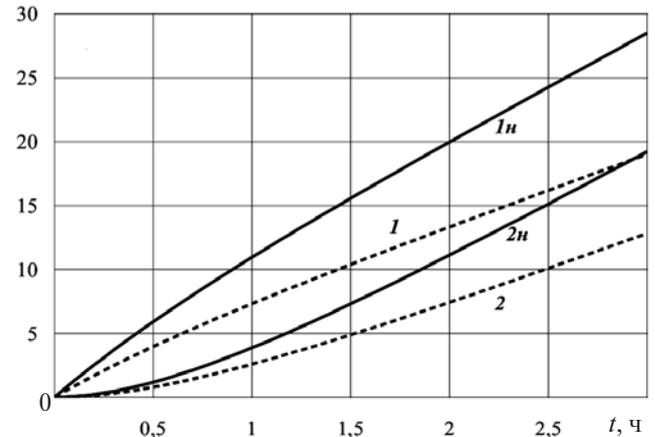


Рис. 5. Расчетные зависимости от времени среднеобъемных температур ротора (I, In) и статора ($2, 2n$) модели обратимого гидрогенератора с выключенным ($1, 2$) и включенным ($In, 2n$) электронагревателем при $n = 420$ об/мин

Длительность ожидания регулярного режима согласно (9) при $dP=0,01$

$$t^* = T_E \ln \frac{1}{dP} = 0,71 \ln \frac{1}{0,01} = 3,27 \text{ с.}$$

Соответствующие кривые нагрева в виде зависимости среднеобъемных избыточных значений температуры ротора и статора от времени для рассматриваемого режима без возбуждения при $n=420$ об/мин показаны на рис. 5.

Заключение. Изложенный метод представляет собой полноценную альтернативу калориметрическому методу измерения потерь применительно к модельному эксперименту, когда многочисленные опыты проводятся при широком варьировании геометрических и физических параметров конструкции электрической машины. В такой ситуации не представляет практических затруднений лишь однократное за время жизни модели выполнение необходимых подготовительных работ по установке тепловой изоляции и дополнительного электронагревателя.

Этого нельзя сказать об испытаниях (пусть даже весьма ответственных) по определению суммы потерь и КПД на готовой машине, например крупном гидрогенераторе. Хотя указанная выше дополнительная работа и здесь проводилась бы однократно, однако и обслуживала бы она один только цикл испытаний, включающий опыты холостого хода, короткого замыкания и отсутствия возбуждения. В данных обстоятельствах сравнительные достоинства динамического метода (сокращение продолжительности испытания в заданном режиме, уменьшение числа измерительных датчиков) едва ли можно противопоставить материальным и тру-

довым затратам на подготовительные процедуры. Тем самым область практического применения обсуждаемого динамического метода фактически ограничивается лабораторным экспериментом на крупномасштабных физических моделях и, возможно, немногими уникальными случаями обширных исследований опытного образца создаваемой машины при многоэтапном варьировании ее конструкции в условиях завода-изготовителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun Yutian, Gao Qingfei. Development of Air-cooled Hydrogenerators for 700MW Level Capacity, CIGRE Session 2011.
2. Chaaban M., Leduc J., Hudon C. et al. Thermal Analysis of Large Hydro-Generator Based on a Multi-physic Approach, CIGRE Session 2011.
3. Публикация МЭК 60034-2А. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия.
4. Гуревич Э.И. О точности определения потерь в крупных электрических машинах калориметрическим методом. — Электричество, 2006, № 11.
5. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. — М.: Гостехиздат, 1954.
6. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. 4-е изд. — Л.: Энергоатомиздат, 1984.

[10.01.12]

Автор: Гуревич Эльрих Иосифович окончил в 1960 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. Защитил докторскую диссертацию «Тепловые исследования и температурная диагностика электрических машин» в НИИЭлектромаш в 1997 г. Профессор кафедры «Электрические машины» Санкт-Петербургского политехнического университета.

* * *

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира. Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485