

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ПО ОБДУВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. А. ЖАДАН, Ю. В. КОПЫЛОВ, Д. И. САННИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

При разработке конструкции вентиляционных систем электрических машин весьма полезно знать распределение эффекта теплоотдачи на охлаждаемых поверхностях, с тем чтобы сознательно изменять конструкцию машины в целях достижения максимальной эффективности вентиляционной системы.

Для измерения локальных коэффициентов теплоотдачи в электрических машинах в настоящее время применяются α -датчики довольно сложной конструкции, имеющие несколько слоев электрической и тепловой изоляции, нагревательные элементы и термопары. Эти датчики позволяют определить коэффициент теплоотдачи для ограниченного участка поверхности с высокой точностью, но вследствие значительных размеров пригодны только для испытания машин средней и большой мощности. Изготовление датчиков столь же сложных по устройству, но миниатюрных, пригодных для малых электрических машин с большой кривизной и сложностью охлаждаемых поверхностей встречает серьезные технические трудности.

В то же время высокая точность измерения необходима только в том случае, когда опыт проводится с целью создания методики теплового расчета определенного типа машин. Если же задача состоит в рационализации конструкции машины, то с помощью датчиков достаточно получить качественную картину распределения теплоотдачи по охлаждаемой поверхности при относительно низкой точности измерения. Для этих целей пригодны датчики, значительно более простые по устройству, что дает возможность существенно уменьшить их размеры до величин, приемлемых при испытаниях малых машин.

Отработка вентиляционных систем проводится на основании исследований как реальных машин, так и тепловых моделей.

Использование моделей позволяет снизить трудоемкость испытаний, а также увеличить объем получаемой информации, так как установка датчиков не ограничивается различными условиями, связанными с сохранением нормальных электромагнитных процессов в реальной машине. В литературе освещен опыт по использованию металлических моделей, пригодных как для вентиляционных, так и для тепловых исследований. В них обычно используются готовые детали электрических машин, снабженные встроенными нагревателями. В большинстве случаев этот принцип используется при исследовании охлаждения корпусов машин закрытого исполнения.

Имеются также сообщения о применении деревянных моделей, воспроизводящих конфигурацию воздушного тракта электрических машин.

Эти модели применяются только для вентиляционных исследований. Однако они могут обеспечить определенные преимущества при некоторых видах тепловых исследований. В частности, с их помощью можно определять не только распределение воздушных потоков и скоростей воздуха, но и распределение интенсивности обдува по различным поверхностям и различным участкам одной поверхности. Для этой цели могут использоваться α -датчики с нагревателями.

Предлагаемый принцип был реализован при исследовании охлаждения корпусов асинхронных двигателей серии А02, проводимых на кафедре электрических машин Томского политехнического института. Деревянная модель корпуса двигателя А02 4-го габарита, изготовленная в натуральную величину, была снабжена обычным металлическим кожухом и вентилятором, приводимым во вращение от вспомогательного двигателя. Измерение поля скоростей воздуха у поверхности модели с помощью трубок полного и статического напора подтвердило идентичность модели и реальной машины в отношении вентиляции.

Основное преимущество деревянной модели при исследовании распределения интенсивности теплоотдачи по поверхности заключается в том, что благодаря низкой теплопроводности дерева утечка тепла от α -датчика на массу модели имеет небольшую величину по сравнению с теплом, отводимым через воздух. Поэтому для измерения коэффициента теплоотдачи может применяться датчик без компенсации теплоотвода через массу.

Измерение интенсивности охлаждения на различных участках поверхности производилось с помощью плоского проволочного термосопротивления на изоляционной подложке из лавсана или кабельной бумаги.

Технология изготовления сопротивления заслуживает специального описания. Провод марки ПЭЛ диаметром 0,05 мм наматывался в один слой на намоточном станке на полихлорвиниловую трубку, затем производилось склеивание витков нитролаком, и полученная миниатюрная однослойная катушка осторожно снималась с трубки. После этого внутренняя поверхность катушки покрывалась слоем клея, катушка сплющивалась в направлении, перпендикулярном оси, и подвергалась сушке под прессом. В результате получался плоский, двухслойный, прямоугольный элемент сопротивления. В частности, для получения квадратной формы элемента диаметр трубки при намотке брался в $\pi/2$ раз меньше длины катушки. Общая толщина двухслойного элемента с лаковыми пленками составляла до 0,19 мм, поверхность одной стороны — 7,5×7,5 мм. Элемент сопротивления приклеивался к изоляционной подложке толщиной 0,2 мм, к которой приклеивались также и выводные концы с припаянными токовыми и потенциальными проводами.

Измерение холодного сопротивления элемента производилось при температуре таящего льда; величина сопротивления составила для различных датчиков из числа изготовленных

$$r_0 = 13 - 14 \text{ ом}$$

в зависимости от колебания числа витков, уложенных при намотке.

Полученные термосопротивления обладают достаточно высоким качеством, выражающимся в надежности, стабильности параметров, равномерном распределении проводников по полю сопротивления, гладкой поверхности теплоотдачи, эластичности, малых размерах, устойчивости к внешним воздействиям и малой инерционности. Они могут успешно применяться для изготовления α -датчиков сложного устройства и в качестве температурных детекторов.

При исследовании распределения теплоотдачи по поверхности термосопротивление служит одновременно нагревателем и датчиком температуры. Рабочая температура в целях повышения точности измерения поддерживается на максимально допустимом для изоляции класса А

уровне — 100—105°. Питание элемента производится от батареи 4,5 в через реостат, измерение сопротивления осуществляется методом амперметра и вольтметра по четырехпроводной схеме.

Рабочая температура поля сопротивления подсчитывается по формуле

$$v_r = \frac{U/I - r_0}{r_0} \cdot 235. \quad (1)$$

Коэффициент теплоотдачи (без поправки на утечку)

$$\alpha^1 = \frac{UI}{S(v_r - v_B)},$$

где S — площадь односторонней поверхности поля сопротивления;
 v_B — температура окружающего воздуха.

Постоянная времени нагрева датчика по опыту составляет 15—20 сек.

Чтобы учесть поправку на утечку тепла от датчика через массу модели, необходимо знать тепловую проводимость утечки по следующему пути: переход тепла через подложку датчика к дереву, растекание тепла по дереву к поверхности модели и теплоотдача от поверхности к воздуху. На последнем этапе коэффициент теплоотдачи поверхности модели, зависящий от скорости ее обдува, по-видимому, оказывает влияние на общую проводимость утечки. Однако в действительности это влияние сводится к нулю, что можно показать математическим путем.

Источник тепла в форме диска с радиусом, равным единице, расположен на поверхности полугограниченного массива из материала с удельной теплопроводностью λ (рис. 1). Между диском и массивом имеется прокладка толщиной δ с теплопроводностью λ_δ . Коэффициент теплоотдачи на поверхности массива — α .

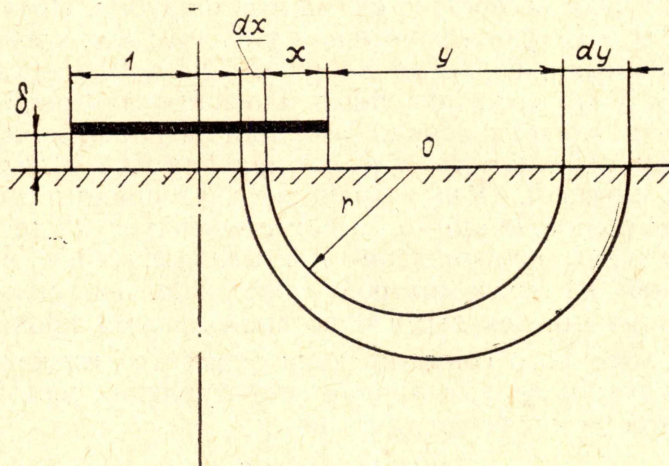


Рис. 1. К расчету проводимости утечки на корпус.

Для принципиального решения вопроса о влиянии α на тепловую проводимость достаточно ограничиться приближенным решением задачи, основанным на следующих допущениях:

1. Тепловая проводимость источника тепла бесконечно велика.
2. Линии теплового потока в прокладке имеют форму вертикальных прямых, а в массиве — форму окружностей с центрами, расположенными на поверхности массива. Начало каждой линии характеризуется координатой ($0 < x < 1$), а конец — координатой ($0 < y < \infty$), между которыми имеется некоторая функциональная связь $y = f(x)$, выраженная непрерывной, монотонно возрастающей функцией.

Элементарная трубка теплового потока имеет начальную ширину dx и конечную —

$$dy f'(x) \cdot dx$$

Начальное сечение трубки

$$2\pi(1-x)dx.$$

Конечное сечение

$$2\pi(1+y)dy = 2\pi[1+f(x)] \cdot f'(x) \cdot dx.$$

Среднегеометрическое сечение

$$2\pi \sqrt{(1-x)[1+f(x)] \cdot f'(x)} \cdot dx.$$

Длина трубки в массиве

$$\pi(x+y) = \pi[x+f(x)].$$

Тепловые сопротивления трех последовательных участков трубки потока:

прокладки —

$$\frac{\delta}{\lambda \delta} \frac{1}{2\pi(1-x)dx} = \frac{\rho_1}{dx},$$

массива —

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\pi[x+f(x)]}{2\pi \sqrt{(1-x)[1+f(x)]f'(x)} \cdot dx} = \frac{\rho_2}{dx},$$

поверхности —

$$\frac{1}{\alpha} \frac{1}{2\pi[1+f(x)] \cdot f'(x) \cdot dx} = \frac{\rho_3}{dx}.$$

Полная тепловая проводимость утечки

$$G_y = \int_0^1 \frac{dx}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}.$$

Функция $f(x)$ должна быть выбрана таким образом, чтобы проводимость G_y имела максимально возможное значение. Точное определение $f(x)$ является задачей вариационного исчисления. Однако в данном случае в этом решении нет надобности. Достаточно исследовать полученное выражение для G_y при простейшем подходящем приближении функции $f(x)$, каким может быть дробно-линейная функция

$$y = \varphi \frac{x}{1-x},$$

отображающая круг единичного радиуса на всю свободную поверхность массива. При этом задача сводится к обычной экстремальной, однако аналитическое определение коэффициента φ из условий максимума G_y —

$$\frac{dG_y}{d\varphi} = 0$$

чрезвычайно затруднительно. Поэтому анализ выражения для G_y при различных значениях φ проводился численным методом. В результате установлено, что G_y стремится к некоторому максимальному пределу при неограниченном возрастании φ . При этом коэффициенты теплового сопротивления участков трубки ρ_1 и ρ_2 стремятся к конечным значениям, а ρ_3 стремится к нулю.

Таким образом, из выражения для G_y исчезает член, содержащий коэффициент теплоотдачи с поверхности массива. Отсюда можно сде-

лать вывод, что в рассмотренном идеализированном случае проводимость утечки не зависит от коэффициента теплоотдачи.

Полученный вывод можно перенести на реальные условия работы датчика, так как квадратная форма нагревателя и анизотропное строение дерева не имеют принципиального значения. Конечные размеры модели также не вносят существенных изменений в полученный вывод, так как тепловое сопротивление массива в основном сосредоточено вблизи контакта нагревателя с массивом. Основной практический вывод из вышеизложенного состоит в том, что поправка к показаниям α -датчика, учитывающая утечку тепла на массу, является постоянной величиной и может быть определена экспериментально при одном режиме охлаждения, лучше всего при теплоотдаче в спокойный воздух.

В начале определяется коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции с помощью элемента сопротивления, расположенного свободно (без подложки) в спокойном воздухе в вертикальной плоскости.

$$\alpha_0 = \frac{U_1 I_1}{2S (v_{\Gamma 1} - v_{B1})}. \quad (3)$$

Затем датчик с подложкой приклеивается в вертикальной поверхности модели. В этом случае с одной поверхности элемента тепло отводится к спокойному воздуху при том же значении коэффициента теплоотдачи α_0 , а с другой поверхности — на массу модели за счет утечки. Уравнение теплового баланса при этом

$$U_2 I_2 = (\alpha_0 S + G_V) (v_{\Gamma_2} - v_{B2}) = \alpha'_0 S (v_{\Gamma_2} - v_{B2}),$$

откуда поправка к опытному значению α

$$\Delta\alpha = \frac{G_y}{S} = \alpha'_0 - \alpha_0 = \frac{U_2 I_2}{S (V_{\Gamma_2} - V_{B2})} - \alpha_0. \quad (4)$$

Значения коэффициента теплоотдачи, полученные при измерениях в воздушном потоке при искусственной конвекции по формуле (2), уточняются

$$\alpha = \alpha' - \Delta\alpha. \quad (5)$$

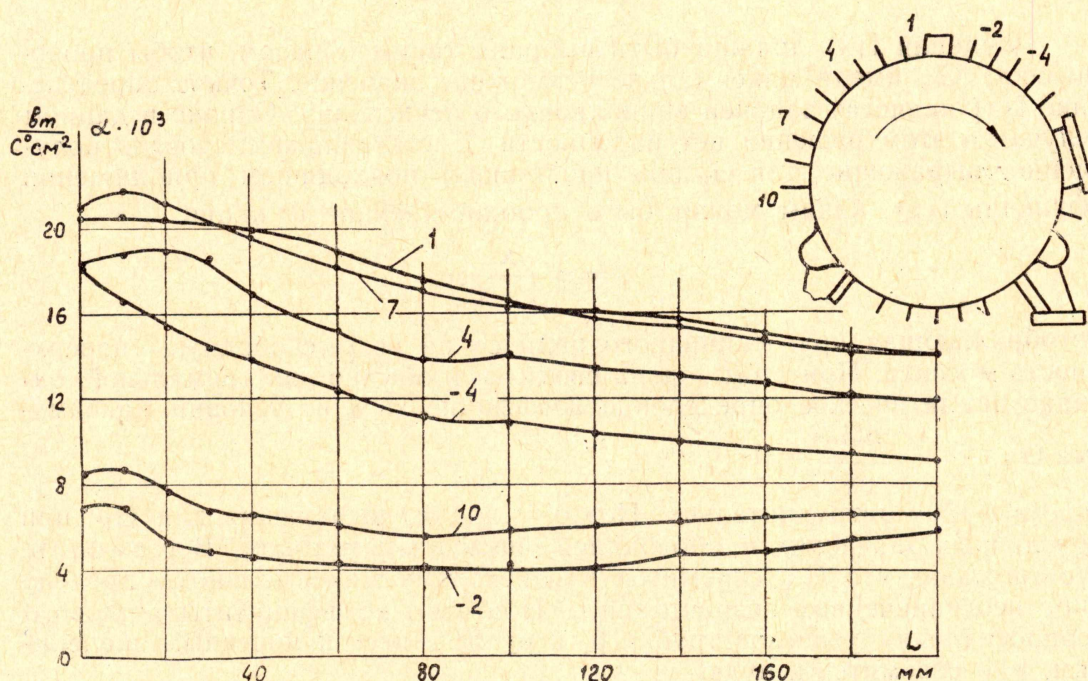


Рис. 2. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине каналов.

На рис. 2 приведены данные измерения коэффициента теплоотдачи в нескольких междуреберных каналах деревянной модели двигателя А02 4-го габарита. Измерения проводились в 4 точках по периметру канала. При этом значения α отличались не более чем на 10%. Изменение коэффициента по длине каналов является более значительным. Особенно велика разница α в различных каналах, отличающихся по условиям протекания воздуха.

Полученные данные свидетельствуют о первоочередной необходимости разработки конструкции, обеспечивающей равномерную подачу воздушного потока по всем междуреберным каналам станины, а во вторую очередь — уменьшения спада скорости воздуха по длине канала.