

УЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ В ТЕПЛОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Хорошко А.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Практика эксплуатации тяговых электрических машин показывает, что наиболее распространенной является работа двигателей в нестационарных режимах. Эти режимы возникают при пуске двигателей, отключении, торможении, изменении нагрузки и частоты вращения машин, сопровождаются быстрым и опасным повышением температуры отдельных узлов двигателей [1]. Неоднократные превышения допустимой температуры элементов конструкции электродвигателя приводят к преждевременному выходу из строя ТЭД. Причиной отказов ТЭД чаще всего является температурное старение изоляции и ее пробой. Поэтому важно контролировать тепловое состояние изоляционной системы. В процессе эксплуатации ТЭД прямые измерения невозможны. В этой связи актуальным становится контроль температурного состояния косвенными методами с использованием методов моделирования.

Для получения информации о температурном поле машины была разработана тепловая математическая модель (ТММ), которая позволяет судить о тепловом состоянии тягового электродвигателя, путем расчета температур отдельных узлов ТЭД по нескольким информационным значениям. Математическая модель была разработана на примере тягового электродвигателя постоянного тока ТЛ-2К1. По аналогии могут быть разработаны подобные модели для других электродвигателей с учетом применяемых изоляционных материалов. Использование данной тепловой модели ТЭД позволяет контролировать температуру таких частей машины, как коллектор или якорная обмотка при вращении машины, имея информацию только о нескольких параметрах электродвигателя [2].

Структурная схема предложенной тепловой модели ТЭД представлена на рис.1 .

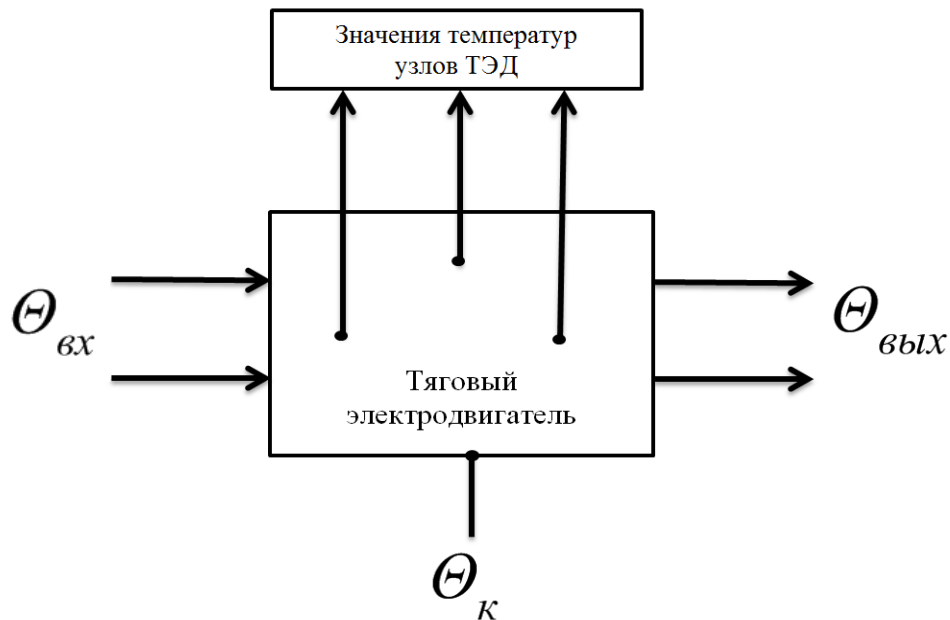


Рисунок 1. Структурная схема тепловой модели ТЭД, где $\theta_{вх}$ - температура на входе вентилирующего воздуха; $\theta_{вых}$ - температура на выходе вентилирующего воздуха; $\theta_{к}$ - температура корпуса (остова), определяемая термопарой

Разработанная тепловая математическая модель построена на основе решения задач теплопроводности и позволяет вычислить установившиеся температуры различных узлов ТЭД постоянного тока, учитывая температуру окружающей среды и производительность вентилятора воздушного принудительного охлаждения.

Использование данной модели для динамических режимов работы ТЭД представляется возможным в двух случаях.

Одним из них является расчет температур в нестационарном режиме работы посредством учета коэффициентов корреляции Пирсона. Использование данных коэффициентов позволяет установить взаимосвязь между измеряемыми температурами на входе и на выходе ТЭД, температурой остова и расчетными температурами отдельных узлов электродвигателя. Говорить о корреляционной взаимосвязи между этими температурами можно в том случае если каждому значению одной из них соответствует определенное распределение температуры другого узла.

При рассмотрении данного метода, применительно к разработанной тепловой математической модели двигателя ТЛ-2К1, для определения корреляции между двумя температурами были сделаны случайные выборки Θ_i (температур узлов двигателя), другая – $\Theta_{вых}$ (температура воздуха на выходе из двигателя), $\Theta_{к}$ (температура остова).

Взаимосвязь между этими величинами была проанализирована с использованием диаграммы рассеивания, представленная на рис.2. Взаимосвязь между данными выборками можно характеризовать как сильно положительная линейная [3], т.е., вследствие, увеличения температур узлов двигателя увеличиваются значение выходной температуры воздуха и температуры остова.

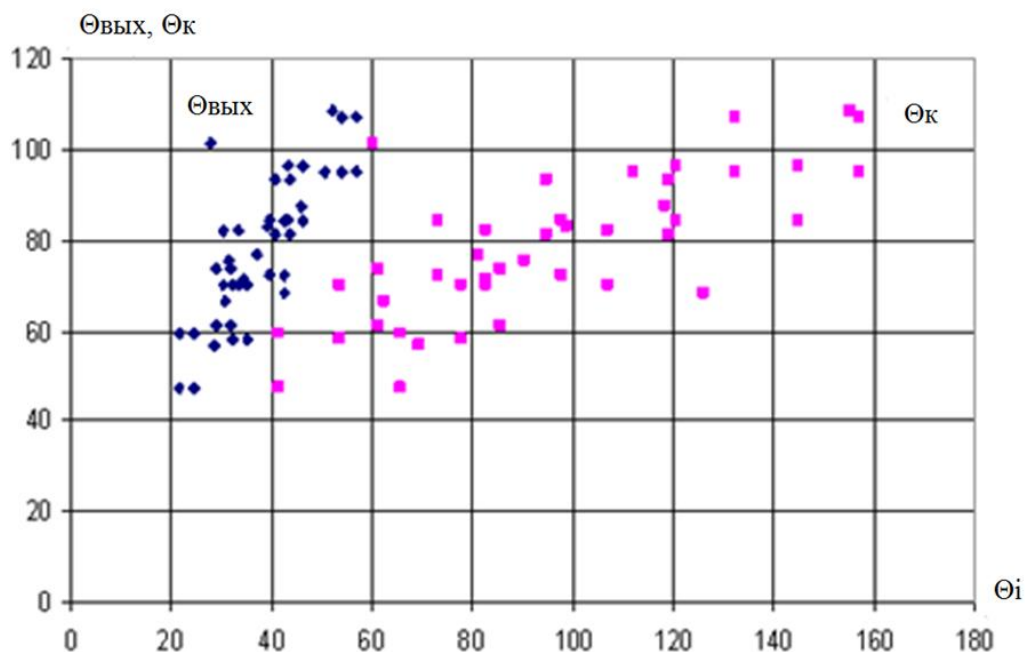


Рисунок 2. Взаимосвязь выходной температуры и температуры остова с температурами остальных узлов ТЭД

Для оценки линейной взаимосвязи между температурами использовался выборочный коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_x S_y},$$

где \bar{X} - среднее арифметическое для Θ_i ;

\bar{Y} - среднее арифметическое для $\Theta_{\text{вых}}$ и $\Theta_{\text{к}}$;

S_x - выборочное среднеквадратическое для Θ_i ;

S_y - выборочное среднеквадратическое для $\Theta_{\text{к}}$ и $\Theta_{\text{вых}}$, n – объем выборки.

Применение данного коэффициента позволяет оценить влияние температур узлов ТЭД на температуры остова и воздуха на выходе из двигателя и произвести

корректировку получившихся в результате моделирования установившихся температур этих узлов для нестационарного режима.

Корректировка температур производится по температуре воздуха на выходе из двигателя по выражению:

$$\Theta_i = \Theta_{\text{расч}i} + (\Theta_{\text{ВЫХ}_{\text{изм}}} - \Theta_{\text{ВЫХ}_{\text{расч}}}) \cdot r_i$$

Θ_i – скорректированное значение искомой температуры; $\Theta_{\text{расч}i}$ – значение искомой температуры, рассчитанное с помощью ТММ; $\Theta_{\text{ВЫХ}_{\text{изм}}}$ – значение температуры выходного воздуха, измеренное на двигателе; $\Theta_{\text{ВЫХ}_{\text{расч}}}$ – значение температуры выходного воздуха, рассчитанное по ТММ; r_i – коэффициент корреляции.

При этом характер изменения температуры при нагреве и охлаждении принимает вид ломанной кривой вместо экспоненты. Это обстоятельство является причиной высокой погрешности, что имеет существенное значение при тепловых расчетах. В результате, более целесообразным представляется применение второго метода расчета температур при неустановившемся режиме.

Суть второго метода заключается в определении фактического времени нагрева опорного узла, по которому определяются температуры остальных узлов электродвигателя.

В качестве опорного узла тягового электродвигателя был выбран корпус ТЭД, так как контролирование его температуры возможно при помощи установления на нем термопары.

Дальнейший расчет по методу сводится к определению постоянных нагрева элементов двигателя, с учетом внутреннего и внешнего теплового сопротивления узлов двигателя при определенных условиях охлаждения:

$$T = cM / (\lambda_\alpha + \lambda_\lambda),$$

где c – теплоемкость материала;

M – масса узла;

λ_α – внешнее тепловое сопротивление, характеризующееся конвективным теплообменом;

λ_λ - внутреннее тепловое сопротивление, характеризующееся теплопроводностью материала.

В результате, имея информацию о температурах опорного узла: фактическую, полученную посредством измерения термопарой и установившуюся, рассчитанную с помощью ТММ, а так же информацию о постоянной нагрева данного узла, становится возможным определения времени фактического нагрева этого узла:

$$t_\phi = -T \cdot \ln \left(\frac{\Theta_K - \Theta_{уст}}{\Theta_0 - \Theta_{уст}} \right),$$

где T – постоянная нагрева корпуса с учетом условий его охлаждения; Θ_K – температура корпуса, измеренная при помощи термопары; $\Theta_{уст}$ – установившаяся температура корпуса, рассчитанная при помощи ТММ; Θ_0 – температура окружающей среды.

Далее, зная фактическое время нагрева опорного узла возможно определить фактическую температуру нагрева элементов конструкции электродвигателя по средствам применения кривых нагрева:

$$\Theta_\phi = \Theta_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_\phi}{T}} \right) + \Theta_0 \cdot e^{-\frac{t_\phi}{T}},$$

где Θ_ϕ - фактическая температура узла; $\Theta_{уст}$ - установившаяся температура узла, рассчитанная по ТММ; T – постоянная нагрева узла, с учетом условий его охлаждения.

Для проверки адекватности расчетов по рассмотренным методам были проведены экспериментальные исследования на реальном двигателе. В таблице представлены данные температур узлов ТЭД по результатам экспериментального исследования для электродвигателя ТЛ-2К1 и рассчитаны погрешности расчета температур по описанным методам.

Таблица. Результаты исследований и погрешность расчета

Наименован	Эксперимен тальные	Значения температур	Погрешност ь расчета с	Значения температур	Погрешност ь расчета с
------------	-----------------------	------------------------	---------------------------	------------------------	---------------------------

ия узлов ТЭД	значения температур	(рассчитанн ые по первому методу)	использован ием модели, по первому методу, %	(рассчитанн ые по второму методу)	использован ием модели, по второму методу, %
Коллектор	54	58	7,40	55	1,9
Пазовая часть ОЯ	66	72	9,09	67	1,5
Лобовая часть ОЯ	65	67	3,07	67	3,1
Сталь якоря	59	62	5,08	60	1,7
Пазовая часть обмотки ГП	72	78	8,33	70	2,8
Лобовая часть обмотки ГП	73	80	9,59	74	1,4
Сталь ГП	66	60	9,09	68	3,0
Пазовая часть обмотки КО	75	72	4,00	77	2,7
Пазовая часть обмотки КО	70	70	0,00	72	2,8
Пазовая часть обмотки ДП	67	61	8,95	69	2,9
Пазовая часть обмотки ДП	70	65	7,14	74	5,7
Сталь ДП	65	71	9,23	69	6,2
Выходная температура воздуха	40	36	10,00	40	0,00
Остов	54	51	5,55	54	0,00

Максимальное расхождение расчетных данных температур, с измеренными пирометром по обоим методам не превышает 10 %, что говорит о довольно точных расчетах, производимых по математической модели. Однако сравнительный анализ по каждому из методов показывает, погрешность расчетов по методу, использующему определение постоянных нагрева элементов двигателя, дает меньшую погрешность.

Тем самым можно сделать вывод о наибольшей предпочтительности применения второго метода для ТММ.

Литература

1. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : учебное пособие / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. — М. : Высшая школа, 1989. — 239 с.
2. Дорохина Е.С., Хорошко А.А., Рапопорт О.Л. Система мониторинга теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока //Известия высших учебных заведений. Электромеханика.— 2012.— № 4.— С. 16-21.
3. Константинова Л.И.. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005. — 139 с.: ил.