

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Рак А.Н.

Донецкий государственный технический университет

vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

*To increase qualities of operation miner of electric motors it is possible at the expense of introduction of means of thermal monitoring and forecasting on this basis of residual service life of isolation of windings of electric motors. The thermal equivalent circuit is developed which takes into account mutual thermal influence of main knots and which can immediately be used in a system of thermal monitoring and diagnostics. The mathematical modelling is executed it and the outcomes which insignificantly are obtained differ from experimental.*

Локомотивный транспорт является важным звеном технологического транспорта на шахтах. В качестве его привода применяются рудничные тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Тяжелые условия эксплуатации, большое количество пусков и торможений, вызывают систематические тепловые перегрузки и как следствие, преждевременный выход из строя электродвигателей. Эффективное функционирование локомотивов в таких условиях требует создания резерва электродвигателей, что сокращает оборотные средства предприятий и увеличивает затраты на ремонт.

Повысить эффективность эксплуатации электродвигателей локомотивов можно за счет комплексного подхода к решению этой задачи, что заключается во внедрении средств теплового контроля и прогнозировании на этой основе остаточного срока службы изоляции рудничных тяговых электродвигателей (РТД).

Известны методы по определению превышений температуры, которые используются при проектировании электродвигателей и эксплуатации [ 1 ]. В настоящее время методы контроля теплового состояния разделяют на: методы непосредственного контроля температуры с помощью встроенных датчиков температуры и косвенного контроля. Для защиты электродвигателей подвижных объектов, в условиях шахт применение методов непосредственного контроля невозможно. Устройства с косвенным контролем температуры делятся на аналоговые и дискретные. В устройствах с косвенным контролем теплового состояния, выполняемых на резисторах и емкостях существенным недостатком является нестабильность характеристик емкостей и невозможность автоматического выбора параметров модели в зависимости от режима работы [ 2 ]. Поэтому целесообразнее использовать дискретные устройства, которые в свою очередь позволяют проводить непрерывный тепловой контроль и прогнозировать остаточный срок службы изоляции электродвигателей. В ДонГТУ разработана методика прогнозирования остаточного срока службы изоляции электродвигателей в режимах с постоянно изменяющейся температурой.

Для построения системы теплового контроля и прогнозирования требуется решить задачи :

- оценки динамики тепловых свойств узлов электродвигателя;
- выбор и расчет параметров тепловой модели;
- выбор и расчет параметров узла для прогнозирования остаточного срока службы изоляции.

Для решения этих задач проанализированы различные методы определения температуры  $\theta = f(t)$  и выбран метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС). В методе ЭТС реальные пути передачи тепловых потоков заменяются тепловыми сопротивлениями. Многомерные тепловые потоки рассматриваются как результат взаимодействия одномерных, каждый из которых в соответствующем направлении испытывает тепловое сопротивление. Основные допущения метода позволяют применить к нему законы и методы теории электрических цепей, которые состоят в замене распределенных источников тепла и тепловых сопротивлений некоторым числом сосредоточенных эквивалентных тепловых сопротивлений [ 3 ].

Метод позволяет - создать достаточно точную и удобную модель тепловых процессов в узлах рудничного тягового электродвигателя. Он обладает достаточно распространенным математическим аппаратом, что является важным условием учета всех особенностей динамики тепловых процессов.

Рудничные тяговые двигатели серии ДРТ-13, рассматриваемые в качестве объекта исследования, представляют собой взрывозащищенные электрические машины закрытого исполнения с естественным охлаждением, ЭТС таких двигателей достаточно сложные. Расчет параметров ЭТС базируется на опытно-экспериментальных данных об источниках тепла, величинах тепловых сопротивлений отдельных узлов машины, о распределении тепловых потоков в машине и их взаимном влиянии [ 3 ]. На рис. 1. представлена одна из ЭТС РТД, которая учитывает взаимное тепловое влияние основных узлов и которую можно непосредственно использовать в системе теплового контроля и диагностики.

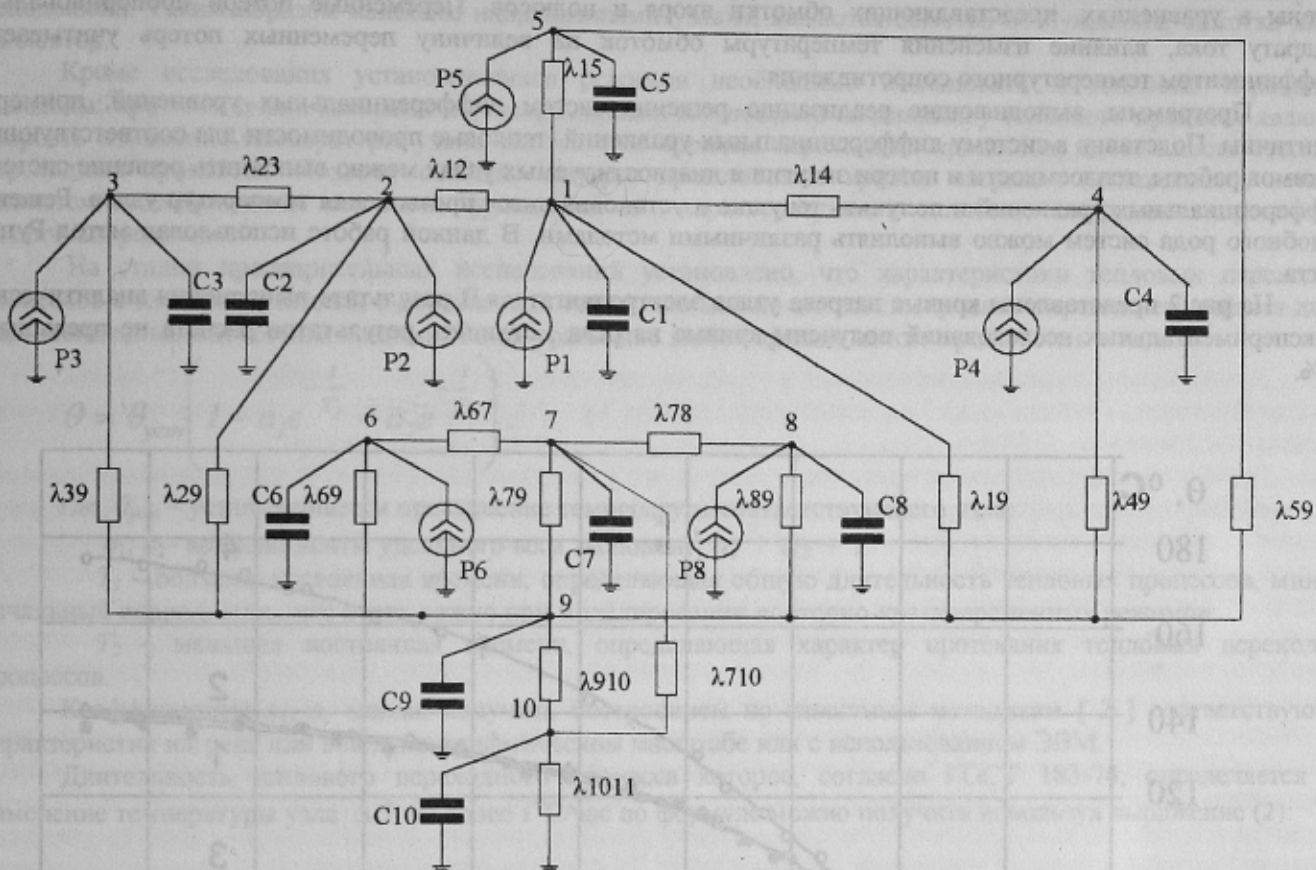


Рисунок 1 - Тепловая схема замещения рудничного тягового двигателя

Узлам схемы соответствуют: 1 - пазовая часть обмотки якоря; 2, 4 - лобовые части обмотки якоря; 3 - коллектор; 5 - сердечник якоря; 6 - обмотка возбуждения; 7 - сердечник главного полюса; 8 - наконечник главного полюса; 9 - внутренний воздух; 10 - корпус. На основании схемы составлена система дифференциальных уравнений.

Система уравнений (1), приведенная в матричной форме позволяет моделировать динамику теплового процесса нагрева. При моделировании динамики режима охлаждения, правые части системы дифференциальных уравнений приравнивают нулю и выполняют ее решение, но при этом необходимо изменить величины некоторых тепловых проводимостей, что связано с различием условий теплообмена для соответствующих режимов.

При моделировании повторно-кратковременных режимов работы электродвигателя выполняется периодическое решение уравнений нагрева и охлаждения вплоть до квазистационарного состояния. Кроме расчета динамических режимов с помощью указанной системы можно получить и значения установившихся превышений температуры узлов. Для этого в системе исключают все члены уравнений содержащие дифференциалы.

$$C \cdot \frac{d\theta}{dt} + \lambda \cdot \theta = P, \quad (1)$$

где:  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{10})$  - матрица превышений температуры узлов, входящих в схему;

$\lambda = (\lambda_{ij})$  - квадратичная матрица тепловых проводимостей между узлами;

$C = (C_1, C_2, \dots, C_{10})$  - матрица теплоемкостей соответствующих узлов;

$P = (P_1, P_2, \dots, P_{10})$  - матрица отдельных потерь в узлах машины при температуре окружающей

среды;

$$\frac{d\theta}{dt} = \left( \frac{d\theta_1}{dt}, \frac{d\theta_2}{dt}, \dots, \frac{d\theta_{10}}{dt} \right) - \text{матрица превышений температуры.}$$



Правые части системы уравнений (1) активных частей машины представляют собой потери в узлах-источники тепла, которые разделяются на постоянные и переменные: постоянные имеют место лишь в сердечнике и на главных полюсах, они не зависят от нагрузки машины и температуры. Переменные потери учтены в уравнениях, представляющих обмотки якоря и полюсов. Переменные потери пропорциональны квадрату тока, влияние изменения температуры обмоток на величину переменных потерь учитывается коэффициентом температурного сопротивления.

Программы, выполняющие реализацию решения систем дифференциальных уравнений, примерно идентичны. Подставив в систему дифференциальных уравнений тепловые проводимости для соответствующих режимов работы, теплоемкости и потери энергии в диагностируемых узлах можно выполнить решение системы дифференциальных уравнений и получить текущие и установившиеся превышения температур узлов. Решение подобного рода систем можно выполнять различными методами. В данной работе использован метод Рунге-Кутты.

На рис.2 представлены кривые нагрева узлов электродвигателя. В результате выполнения аналитических и экспериментальных исследований получены кривые нагрева, отличие результатов расчета не превышает 10%.

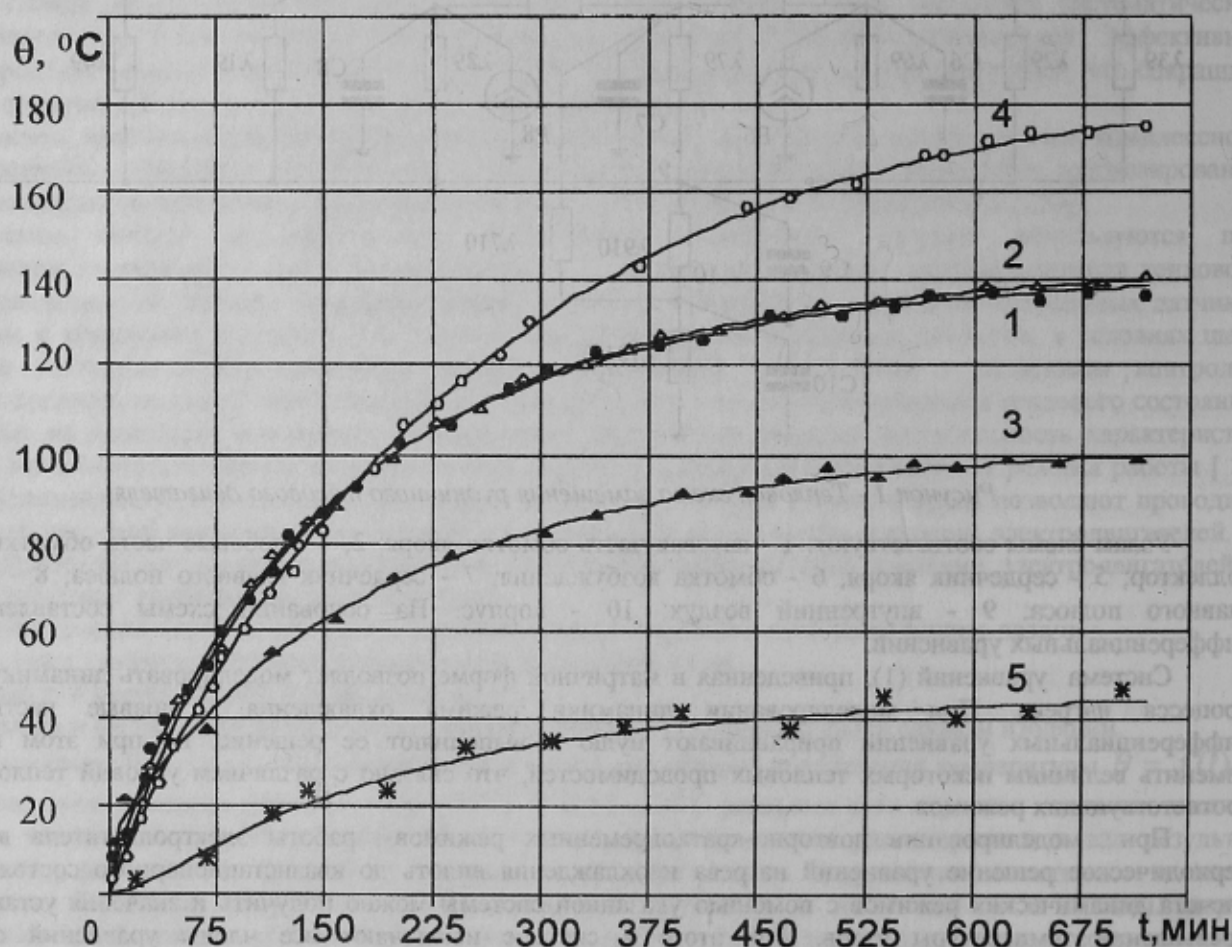


Рисунок 2 - Характеристики нагрева узлов электродвигателя ДРТ-13 в режиме S1  
 Превышение температур: 1 обмотка якоря (--- расчёт, ● - эксперимент);  
 2-сердечник якоря (--- расчёт, Δ - эксперимент);  
 3-коллектор (--- расчёт, Δ - эксперимент);  
 4- обмотка возбуждения (--- расчёт, ○ - эксперимент);  
 5 - корпус (--- расчёт, \* - эксперимент)

При решении системы получены установившиеся превышения температуры различных узлов. При этом можно отметить, что их значения не превышают допустимых значений, указываемых в соответствующих ТУ на испытания рудничных тяговых электродвигателей. Так обмотка якоря ( кривая 1) имеет превышение температуры 142.1°C, а допустимое -150 °С; сердечник якоря ( кривая 2) -143.6(150) °С; коллектор ( кривая 3) - 102.8(120)°С; корпус ( кривая 5) - 45.82(60) °С. Высокий уровень нагрева коллектора объясняется процессами коммутации и трением, пазовой части обмотки якоря ( кривая 1) - объясняется отсутствием каких-либо каналов для дополнительной вентиляции, а также выделением потерь мощности именно в обмотке якоря. основное тепло от этой части обмоток отводится через сталь якоря, который нагревается и за счет имеющихся в нем

магнитных потерь. Низкий уровень нагрева корпуса объясняется непосредственным контактом с окружающей средой. Превышение температуры обмотки возбуждения достигает 185.2 (180) °С. Повышенный уровень нагрева обмотки возбуждения (кривая 4) объясняется худшими условиями теплоотвода - поскольку она неподвижна. Таким образом наиболее напряженными узлами являются обмотка возбуждения, обмотка якоря, коллектор.

Кроме исследования установившихся режимов необходимо исследовать и тепловые переходные процессы: при этом очень важными характеристиками влияющими на динамику теплового процесса являются скорость изменения температуры узлов, постоянные времени переходных процессов, длительность тепловых переходных процессов. Поэтому особый интерес представляют кривые нагрева (охлаждения), которые являются своеобразными весовыми функциями и характеризующие тепловые переходные процессы в различных режимах.

На стадии предварительных исследований установлено, что характеристики тепловых переходных процессов в электродвигателях с достаточной точностью можно аппроксимировать выражением с двумя двумя экспоненциальными составляющими. Тогда уравнение любой кривой можно представить в виде:

$$\theta = \theta_{уст} \left( 1 - a_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - a_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (2)$$

где  $\theta_{уст}$  - установившееся превышение температура соответствующего узла;

$a_1, a_2$  - коэффициенты удельного веса экспонент;  $a_1 + a_2 = 1$

$T_1$  - большая постоянная времени, определяющая общую длительность тепловых процессов, мин., в начальный период, мин., что очень важно при моделировании повторно-кратковременных режимов;

$T_2$  - меньшая постоянная времени, определяющая характер протекания тепловых переходных процессов.

Коэффициенты  $a_1, a_2$  можно получить построением по известным методикам [ 2 ] соответствующих характеристик нагрева или в полупологарифмическом масштабе или с использованием ЭВМ.

Длительность теплового переходного процесса которое, согласно ГОСТ 183-74, определяется как изменение температуры узла  $\Delta\theta$  не более 1°С/час по формуле можно получить используя выражение (2):

$$\Delta\theta = \theta_{уст} \left( a_1 e^{-\frac{t_{пр}-60}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{t_{пр}-60}{T_2}} - a_1 e^{-\frac{t_{пр}}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{t_{пр}}{T_2}} \right) = \theta_{уст} \left( a_1 e^{-\frac{t_{пр}}{T_1}} \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) + a_2 e^{-\frac{t_{пр}}{T_2}} \left( e^{\frac{60}{T_2}} - 1 \right) \right), \quad (3)$$

где  $t_{пр}$  - длительность переходного процесса, ч

Если принять во внимание тот факт, что основное влияние на длительность переходного процесса оказывает большая постоянная времени  $T_1$ , то можно влиянием  $T_2$  пренебречь, и тогда (3) примет вид:

$$\Delta\theta = \theta_{уст} \left( a_1 e^{-\frac{t_{пр}}{T_1}} \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) \right), \quad (4)$$

Выполнив некоторые преобразования и принимая во внимание, что  $\Delta\theta = 1$ , согласно требований ГОСТ 183-74 получаем:

$$t_{пр} = T_1 \ln \left( \frac{\Delta\theta}{\theta_{уст} a_1 \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right)} \right) = T_1 \ln \left( \frac{1}{\theta_{уст} a_1 \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right)} \right), \quad (5)$$

Результаты расчетов и аппроксимаций для узлов сведены в табл. 1.



Таблица 1

Результаты расчетов параметров переходных процессов при нагреве

№	$\theta_{уст.}$ °C	$a_1$	$T_1, мин$	$a_2$	$T_2,$ мин	$t_{пн,ч}$	$a_1/T_1,$ мин <sup>-1</sup>	$a_2/T_2,$ мин <sup>-1</sup>	$a_1/T_1 + a_2/T_2,$ мин <sup>-1</sup>	$\theta_{уст.} \cdot (a_1/T_1 + a_2/T_2),$ °C/мин
1	142.1	0.615	228	0.385	55.9	12.4	0.01	0.007	0.017	2.4
2	143.6	0.628	227.8	0.372	105.7	12.5	0.027	0.0035	0.0305	4.37
3	102.8	0.665	229.7	0.335	18.7	11.5	0.029	0.018	0.047	4.83
4	185.2	1.099	233.3	-0.099	33	15.86	0.004	-0.0003	0.0037	0.68
5	45.82	0.897	229	0.103	40.3	9.58	0.003	0.003	0.006	0.27

Длительность тепловых переходных процессов для обмотки якоря ( кривая 1) составляет 12.4 ч., сердечника якоря ( кривая 2) – 12.5 ч., коллектора ( кривая 3) – 11.5 ч., обмотки возбуждения ( кривая 4) – 15.86 ч., корпуса ( кривая 5) – 9.58 ч.

При разложении кривых нагрева можно видеть, что узлы вращающейся части при различных значениях установившихся превышений температуры имеют примерно одинаковые значения коэффициентов аппроксимирующих экспонент, следовательно формы кривых совпадают. Коэффициенты аппроксимирующих экспонент узлов неподвижной части существенно отличаются от коэффициентов вращающейся части. Для кривой нагрева обмотки возбуждения большая постоянная времени  $T_1$  значительно больше постоянной  $T_2$ , поэтому ее можно аппроксимировать одной экспонентой. Если большие постоянные времени  $T_1$  для всех узлов примерно одинаковы, то малые -  $T_2$  сильно отличаются. На скорость изменения температуры узлов вращающейся части и обмотки возбуждения значительное влияние оказывает большая постоянная времени  $T_1$ . На скорость изменения температуры корпуса ( кривая 5) влияние постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  одинаково. В начальные периоды тепловых переходных процессов т.е. при влиянии  $T_2$  наибольшую скорость изменения температуры имеет коллектор ( кривая 3), обмотка якоря ( кривая 1), сердечник якоря ( кривая 2); наименьшую - корпус ( кривая 5) и обмотка возбуждения ( кривая 4). При влиянии  $T_1$  наибольшую скорость изменения имеет коллектор ( кривая 3), сердечник якоря ( кривая 2), обмотка якоря ( кривая 1); наименьшую - обмотка возбуждения ( кривая 4) и корпус ( кривая 5) Наибольшую скорость изменения температуры имеют: коллектор( кривая 3) - 4.83°C/мин., сердечник якоря ( кривая 2) - 4.37°C/мин., обмотка якоря ( кривая 1) - 2.4°C/мин., обмотка возбуждения ( кривая 4) - 0.68°C/мин. Наименьшую - корпус ( кривая 5) - 0.27°C/мин.

Как видно из графиков, нагрев узлов вращающейся части не оказывает существенного влияния на нагрев узлов неподвижной части, вследствие большого воздушного зазора.

Приведенное выше дает возможность оценить динамику изменения температуры в узлах, которые могут быть использованы в системе теплового контроля и прогнозирования остаточного срока службы изоляции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник М.З. и др. Защита асинхронных двигателей от перегрева. Аналитический обзор/ Дудник М.З., Федоров М.М., Паркесов В.Г., Михайлов В.Е. Донецкий политехнический институт.- Донецк, 1983.-20 с.- Деп. в ВИНТИ, 1983, № 5.

2 Дудник М.З., Федоров М.М., Паркесов В.Г., Михайлов В.Е. Аналоговая защита асинхронных крановых электродвигателей // Электротехника.-1982.-№ 11, С 58-59.

3. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение электрических машин.- М.: Энергоатомиздат, 1983.-297 с.

4. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин.-Л.: Энергия, 1976.-248 с.