

УДК 621.313

БЛИНДЮК В.С., к.т.н., доцент (УкрГАЗТ).

Моделирование теплового режима работы тягового двигателя в задаче автоматического управления моторвагонным подвижным составом

Вступление, анализ публикаций, постановка задачи исследования

В процессе автоматического управления подвижным составом необходимо выполнять оценку принятых решений с учетом температурных режимов работы тяговых электрических двигателей (ТЭД). Это необходимо для оптимизации управления, минимизации потерь электроэнергии и мощности, продлению ресурса ТЭД.

Следует отметить, что общие положения для моделирования тепловых процессов в тяговых двигателях достаточно представлены в литературе [1-4]. С другой стороны, в моторвагонных подвижных единицах ТЭД имеют особенность – самовентиляцию, а эффективность их охлаждения прямо пропорциональная частоте

обращения якоря, и соответственно, скорости движения поезда [1]. Кроме этого, в отличие от электровозов, моторвагонные подвижные единицы функционируют с частыми пусками и остановками, движением с повышенной скоростью, при этом охлаждение тяговых двигателей преимущественно происходит только в процессе выбега. Если к перечисленному прибавить возможность работы в режимах электрического и рекуперативного торможения, то задача моделирования температурного режима работы ТЭД представляется достаточно нетривиальной.

Рассмотрим график превышения температуры в некоторых режимах работы моторвагонной подвижной единицы на основе кривых (рис. 1), приведенных в работе [2].

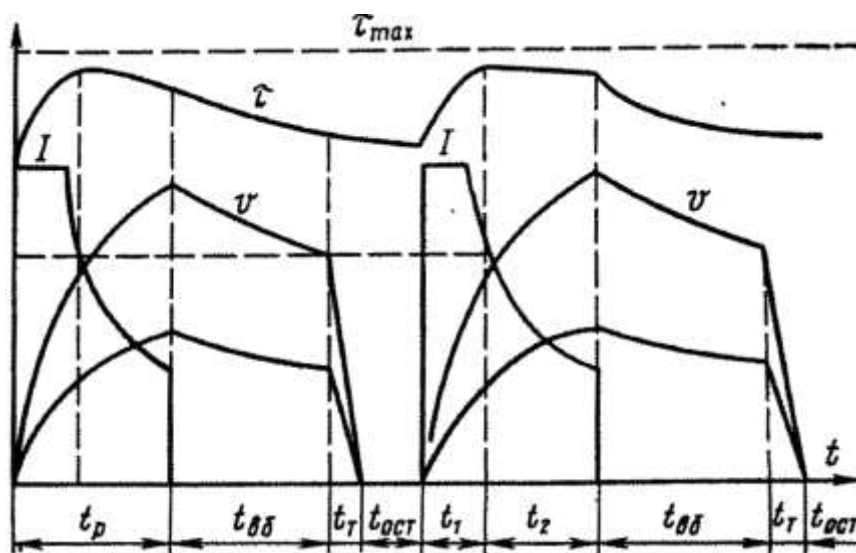


Рис. 1. Кривые скорости движения v , тока I , расхода воздуха Q и превышения температуры тягового двигателя τ при работе электропоезда

Так, при разгоне поезда, на протяжении некоторого времени тяговые двигатели функционируют с током, превышающим его номинальное значение $I_{ном}$. Скорость движения v и расхода воздуха Q в этот период незначительные, поэтому происходит существенный нагрев обмоток двигателя. Далее, по мере движения, значения v и Q увеличиваются, а ток I уменьшается, поэтому в этот период значение τ также уменьшается. В случае, если к моменту остановки температура двигателей будет значительная, то следующий разгон может привести к превышению τ_{max} .

Основной материал

При разработке математической модели были приняты допущения, такие как, тепловая энергия равномерно распределяется по всему объему ТД и рассеяние тепла происходит равномерно по всей поверхности двигателя.

Предположим, что в ТД, имеющем вначале процесса температуру окружающей среды, за единицу времени выделяется тепловая энергия A калорий, которую назовем тепловым потоком. Часть выделяемого тепла вызывает повышение температуры ТД, а остальная – рассеивается в окружающую среду. Рассеиваемое тепло определяется разностью температур и характеризуется общей теплоотдачей B двигателя. Обозначив теплоемкость двигателя C в кал/°С, как количество тепла, которое поглощается при его нагревании на 1°, а теплоотдачу B в кал/°С, как количество тепла, отдаваемого за единицу времени при разности температур двигателя и окружающей среды в 1°, тогда можно представить тепловой процесс за время dt в виде уравнения теплового баланса [3]

$$A dt = C d\tau + B \tau dt. \quad (1)$$

Левая часть представляет собой тепловую энергию, которая выделяется двигателем за бесконечно малый промежуток времени dt . Тепловой поток A (кал/сек) представляет собой мощность потерь в отдельных частях двигателя ΔP (Вт/сек), B (Вт/°С) и C (Вт·сек/°С) – соответственно теплоотдача и теплоемкость ТД.

Общая теплоотдача зависит от коэффициента теплорассеяния и поверхности ТД

$$B = \alpha S, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплорассеяния, характеризующий удельную отдачу тепла лучеиспусканием и конвекцией с 1 см² поверхности ТД при разности температур 1°.

Интенсивность лучеиспускания с поверхности тел зависит от характера поверхности, ее температуры, и мало зависит от окружающей среды. Интенсивность отдачи тепла естественной конвекцией зависит от разности температур тела и окружающей среды.

Количество тепла, отдаваемого поверхностью тела в окружающую среду за единицу времени можно посчитать как

$$A_1 = \alpha S \tau, \quad (3)$$

где A_1 – тепловая энергия, выделяемая в единицу времени, за определенный отрезок времени dt , которая нагревает тело до температуры, при которой дальнейшее повышение температуры не происходит, то есть $d\tau = 0$.

Тогда,

$$A_1 = B \tau_{\infty} = \alpha S \tau_{\infty}$$

где τ_{∞} – превышение температуры установившегося режима.

Из равенства получаем

$$\tau_{\infty} = \frac{A_1}{\alpha S} = \frac{A}{\alpha S}$$

Отношение $q = \frac{A}{S}$ называется плотностью теплового потока, так как оно характеризует величину теплового потока на единицу поверхности [Вт/см²]. Размерность коэффициента теплорассеяния α составит [Вт/см² °С].

При обдувании нагретого ТД потоком воздуха интенсивность теплоотдачи значительно возрастает. В этом случае используется естественный обдув. Коэффициент теплорассеяния, учитывающий относительную скорость воздуха, имеет вид

$$\alpha_0 = \alpha(1 + \rho_0 \sqrt{v}),$$

где ρ_0 – коэффициент, учитывающий интенсивность обдувания; v – скорость движения обдувающего воздуха.

Для поверхности корпуса ТД при движении поезда можно принять

$$\alpha_0 = 1,67 \cdot 10^{-3} (1 + 0,5 \sqrt{v}), \quad (4)$$

а мощность теплового потока составит

$$A_0 = \alpha (1 + \rho_0 \sqrt{v}) S \tau_\infty = \alpha_0 S \tau_\infty$$

При использовании искусственной вентиляции нагретого тела в ограниченном пространстве, охлаждающий воздух, проходя вдоль нагретой поверхности, нагревается от температуры θ_0 до температуры θ_1 и интенсивность его охлаждающего действия падает по мере приближения к выходу. При условии, что нагревание воздуха происходит равномерно, то есть зависимость $\tau_B = \theta_2 - \theta_1$ от длины тела l линейна (для небольших длин) и температура поверхности тела по всей длине одинакова, тогда превышение температуры тела над внешним воздухом τ в начале и τ_1 в конце пути будет различным. Среднее превышение температуры

тела над окружающим воздухом $\tau_{v\infty}$ для длительного режима ($\tau = \infty$) определяется как

$$\tau_{v\infty} = \tau_\infty - \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} = \tau_\infty - \frac{\tau_B}{2}.$$

Обозначив $\frac{\tau_B}{\tau_\infty} = a$, получим

$$\tau_{v\infty} = \tau_\infty \left(1 - \frac{a}{2}\right)$$

где a – коэффициент подогрева воздуха.

Исходя из вышеизложенного, средний тепловой поток определяется как

$$A_v = \alpha (1 + \rho_0 \sqrt{v}) \left(1 - \frac{a}{2}\right) \tau_\infty S = \alpha_v \tau_\infty S, \quad (5)$$

откуда

$$\alpha_v = \alpha (1 + \rho_0 \sqrt{v}) \left(1 - \frac{a}{2}\right). \quad (6)$$

Для якоря коэффициент теплорассеяния будет

$$\alpha_v = \alpha (1 + \rho_0 \sqrt{v_{\text{я}}}) \left(1 - \frac{a}{2}\right). \quad (7)$$

Здесь

$$\rho_0 = 0,8; \quad v_{\text{я}} = \sqrt{v_{\text{возд}}^2 + v_{\text{я}}^2},$$

где $v_{\text{возд}}$ – максимальная скорость движения вентилирующего воздуха; $v_{\text{я}}$ – окружная скорость якоря.

Для катушек главных и дополнительных полюсов

$$\alpha_v = 1,33 (1 + 0,8 \sqrt{v_{\text{возд}}}) \left(1 - \frac{a}{2}\right).$$

Коэффициент подогрева воздуха a зависит от интенсивности вентиляции и принимается равным $a = 0,17 - 0,21$.

В результате исследований, проведенных на основе модели функционирования ТЭД, приведенной в работе [5], и моделирования теплового режима, в соот-

ветствии с выражениями (1) – (7), получены следующие зависимости.

На рис. 1 и рис. 2 показаны графики изменения входных сигналов от времени (сек) при разгоне поезда: сигнал активной мощности P и скорости воздушного потока обдува двигателя v .

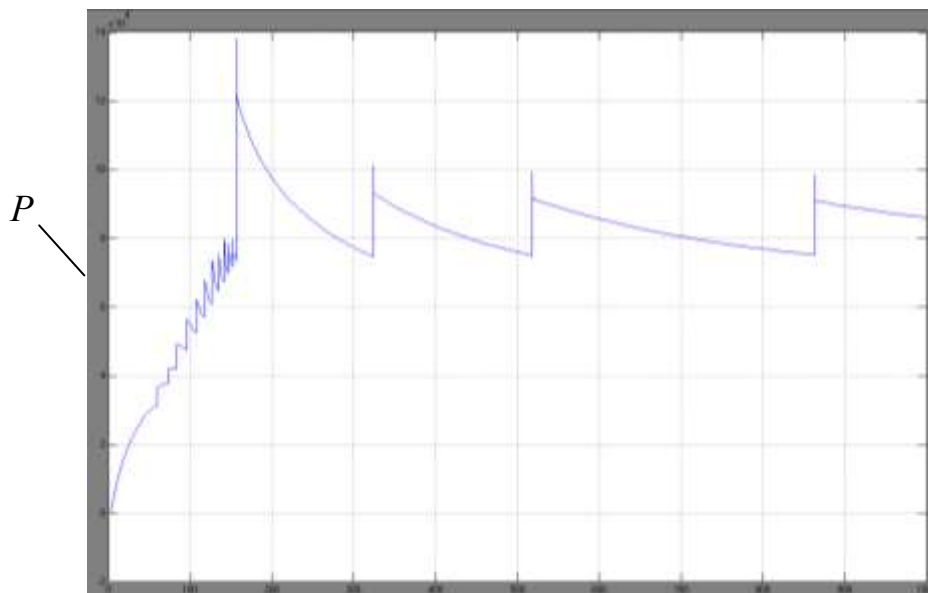


Рис. 1. График активной мощности двигателя

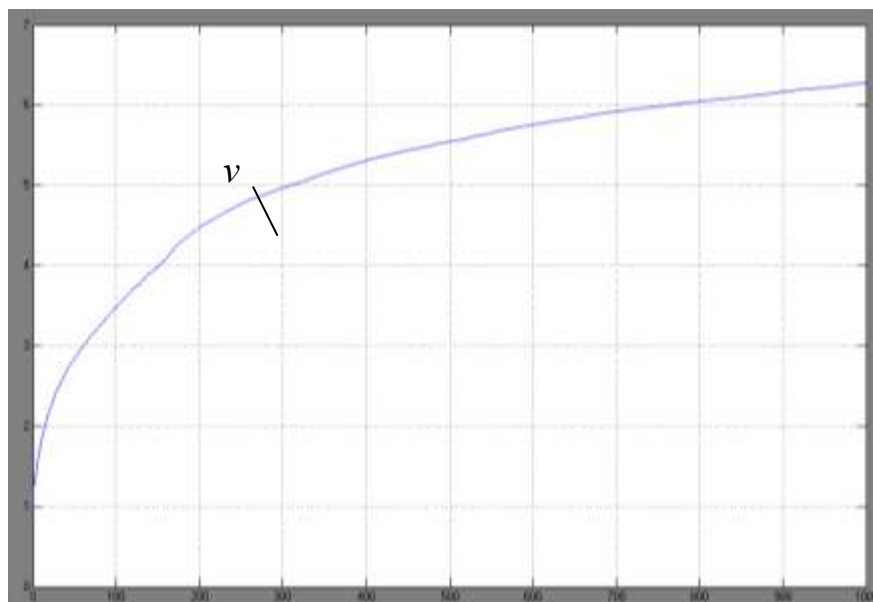


Рис. 2. График скорости воздушного потока обдува двигателя

На рис. 3 приведены графики превышения температуры двигателя τ , и

температуры двигателя τ_0 с учетом температуры окружающей среды $t_{окр} = 20$ °С.

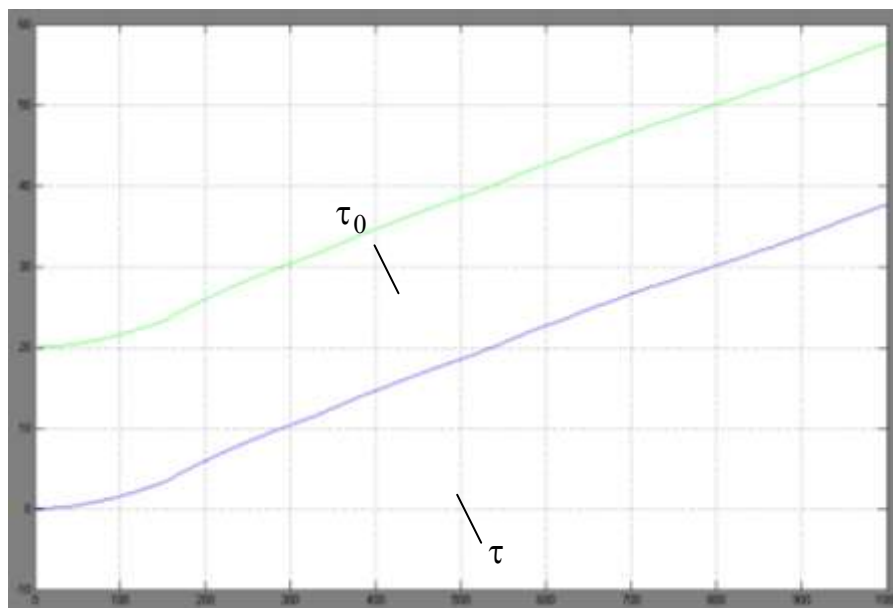


Рис. 3. Графики превышения температуры двигателя и температура двигателя с учетом температуры окружающей среды

Из приведенных графиков видно, что температура двигателя τ_0 повышается с постоянной времени 0,04 [°C/c].

Вывод

В работе получили дальнейшее развитие отдельные положения теории автоматического управления в части управления электротяговым подвижным составом за счет решения научно-прикладной задачи моделирования теплового режима функционирования ТЭД моторвагонной подвижной единицы.

Литература

1. Руководство по устройству электропоездов серии ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. Под ред. Д.В. Пегова, П.В. Бурцева, В.Е. Андреева. – М.: Центр Коммерческих Разработок, – 2003. – 184 с.
2. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с.
3. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. М.: «Энергия»,

– 1974, – 560 с.

4. Грищенко М.А. Математическое моделирование процесса теплопередачи в якоре тягового электродвигателя тепловоза / М.А. Грищенко // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2010. - №1 (22). – с. 33 – 44.

5. Блиндюк В.С. Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу (частина 1) / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць ДонІЗТ. Випуск 28, – Донецьк, – 2011, – С. 202-210.

Анотації:

В работе представлены результаты моделирования теплового режима работы тягового электродвигателя моторвагонного подвижного состава.

В роботі представлені результати моделювання теплового режиму роботи тягового електродвигуна моторвагонного рухомого складу.

In work presented results of modeling of heat state of working tractive electric-engine motor-coach rolling stock.