

УДК 621.313.001.4

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВАНИЯ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПРИ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

А. М. Афанасов

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ НАГРІВАННЯ ОБМОТОК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН ПРИ ПРИЙМАЛЬНО-ЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

А. М. Афанасов

ENERGY EFFICIENCY HEATING COILS FOR TRACTION DYNAMOELECTRIC ACCEPTANCE TESTING

A. M. Afanasov

Приведено аналіз теплових процесів в обмотках тягових електричних машин при їх випробуванні на нагрівання. Запропоновано методіку оцінки енергетичної ефективності випробувань на нагрівання.

Ключові слова: тягова електромашинна, випробування, нагрівання, перевищення температури, теплоємність, тепловіддача, енергетична ефективність.

Приведен анализ тепловых процессов в обмотках тяговых электрических машин при их испытании на нагревание. Предложена методика оценки энергетической эффективности испытаний на нагревание.

Ключевые слова: тяговая электромашинна, испытания, нагревание, превышение температуры, теплоёмкость, теплоотдача, энергетическая эффективность.

1. Введение

Снижение расхода электроэнергии на проведение приёмо-сдаточных послеремонтных испытаний тяговых электромашин является одной из актуальных проблем на предприятиях по ремонту тягового подвижного состава. Испытания на нагревание тяговых электромашин на стенде взаимной нагрузки являются наиболее энергоёмкой частью всей программы испытаний. Энергетические затраты на проведение данного вида испытания могут быть снижены как за счёт повышения энергетической эффективности системы взаимной нагрузки, так и путём оптимизации режима нагружения тяговых электромашин.

2. Постановка задачи исследования

В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] тяговые электрические машины испытывают при приёмо-сдаточных испытаниях в течение одного часа при номинальном напряжении и токе, дающем превышение температуры, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме. Фактически это значение тока соответствует часовому режиму.

Очевидно, что в течение времени испытаний на нагрев, часть тепловой энергии, выделяющейся в обмотках испытуемой электромашины, отдаётся в окружающую среду и не участвует в формировании теплового потенциала обмоток [2]. Целью же данных испытаний является нагрев обмоток тяговой электромашины до определённого превышения температуры за определенное время при заданной мощности теплоотдачи. С этой точки зрения полезной является та часть тепловой энергии, выделяющейся в обмотках, которая идет на повышение их температуры. Она определяется эквивалентной теплоёмкостью и заданным превышением температуры, и не зависит от режима испытания. Следовательно, снижение расхода электроэнергии на тепловые испытания может быть достигнуто путём минимизации общей энергии теплоотдачи за время нагревания до заданного превышения температуры.

Предварительный качественный анализ тепловых процессов, протекающих при данных испытаниях, показывает, что энергия теплоотдачи за время нагревания до заданного превышения температуры обмоток электромашин с ростом тока, а, следовательно, уменьшением времени нагревания, уменьшается. Следовательно, чем больше значение тока нагрузки испытуемой электромашин, тем, при прочих равных условиях, расход электроэнергии на её нагрев меньше.

Для более точной, количественной, оценки влияния испытательного значения силы тока на расход электроэнергии более подробно рассмотрим тепловые процессы, протекающие при нагревании обмотки якоря тяговой электромашин во время её испытания с постоянным током нагрузки. Для большинства тяговых электродвигателей электроподвижного состава именно эта обмотка является лимитирующей по нагреву [3].

3. Энергетическая эффективность нагревания обмотки якоря

Дифференциальное уравнение нагревания обмотки якоря имеет вид [4]

$$\Delta P_{\text{пр}} dt = C_{\text{пр}} d\tau + B_{\text{пр}} \tau \cdot dt, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{пр}}$ – приведенные потери мощности;

$C_{\text{пр}}$ – приведенная теплоёмкость;

$B_{\text{пр}}$ – приведенная теплоотдача;

τ – превышение температуры;

t – текущее время.

Разделив левую и правую части выражения (1) на dt , получим уравнение баланса мощностей в виде

$$\Delta P_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} \frac{d\tau}{dt} + B_{\text{пр}} \tau. \quad (2)$$

Введем обозначения для слагаемых правой части уравнения (2):

$$P_{\text{с}} = C_{\text{пр}} \frac{d\tau}{dt};$$

$$P_{\text{в}} = B_{\text{пр}} \tau.$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{с}} + P_{\text{в}}. \quad (3)$$

Проинтегрировав правую и левую части выражения (1) получим уравнение баланса тепловых энергий в виде

$$\int_0^{t_1} \Delta P_{\text{пр}} dt = C_{\text{пр}} \tau_1 + \int_0^{t_1} B_{\text{пр}} \tau dt, \quad (4)$$

где t_1 – время испытания;

τ_1 – превышение температуры на момент времени t_1 .

Определенный интеграл $\int_0^{t_1} \Delta P_{\text{пр}} dt$ представляет собой полную тепловую энергию, выделившуюся в обмотке якоря. На момент времени t_1 одна часть этой энергии, равная $C_{\text{пр}} \tau_1$, потрачена на повышение температуры обмотки, а другая, равная $B_{\text{пр}} \int_0^{t_1} \tau dt$, рассеяна в окружающую среду.

Приведенные потери мощности $\Delta P_{\text{пр}}$ могут быть представлены в виде [4]

$$\Delta P_{\text{пр}} = I^2 R_0 + I^2 R_0 \alpha \tau + k_{\text{с}} \Delta P_{\text{с}},$$

где R_0 – сопротивление обмотки якоря при температуре окружающей среды;

α – температурный коэффициент сопротивления;

$k_{\text{с}}$ – коэффициент, учитывающий влияние потерь в стали на нагрев обмотки якоря;

$\Delta P_{\text{с}}$ – потери мощности в стали.

В целом потери $\Delta P_{\text{пр}}$ могут быть представлены в виде

$$\Delta P_{\text{пр}} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{т}},$$

где $\Delta P_{\text{э}} = I^2 R_0 + k_{\text{с}} \Delta P_{\text{с}}$ – эквивалентные потери при $\tau = 0$;

$\Delta P_{\tau} = I^2 R_0 \alpha \tau$ – дополнительные потери, зависящие от превышения температуры.

Для удобства введем обозначения для членов уравнения (4) баланса тепловых энергий:

$$\begin{aligned} Q_p &= \int_0^{t_1} \Delta P_{\text{пр}} dt; \\ Q_c &= C_{\text{пр}} \tau_1; \\ Q_b &= B_{\text{пр}} \int_0^{t_1} \tau dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$Q_p = Q_c + Q_b.$$

Если целью тепловых испытаний является нагревание якорной обмотки при данном токе I и теплоотдачи $B_{\text{пр}}$ до превышения температуры τ_1 за время t_1 , то энергия Q_c – является полезной, то есть расходуемой только на повышение τ . Отношение этой энергии к полной энергии Q_p будет характеризовать энергетическую эффективность испытания на нагрев. Назовём это отношение коэффициентом энергетической эффективности $k_{\text{эф}}$.

$$k_{\text{эф}} = \frac{Q_c}{Q_p} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_b}. \quad (6)$$

Он будет показывать, какая часть тепловой энергии, выделяющейся в обмотке якоря, идёт на повышение её температуры.

Для выполнения условия $k_{\text{эф}} \rightarrow \max$ при $Q_c = \text{const}$ необходимо соблюдение условия $Q_b \rightarrow \min$.

На рис. 1 приведены кривые изменения превышения температуры τ и мощностей $\Delta P_{\text{пр}}$, P_c , P_b , входящих в уравнение (3).

Площадь фигуры $ABE0$ представляет собой полную тепловую энергию Q_p за время t_1 . Площадь фигуры $0CE$ является энергией Q_b , которая рассеяна в окружающую среду. Площадь фигуры $ADE0$ представляет собой энергию Q_c , которая пошла на нагревание до превышения температуры τ_1 .

Предварительный анализ кривых на рис. 1 показывает, что с увеличением скорости нагревания $\frac{d\tau}{dt}$ при фиксированном значении τ_1 энергия Q_b будет

уменьшаться. А, следовательно, с ростом тока I коэффициент $k_{эф}$ будет увеличиваться.

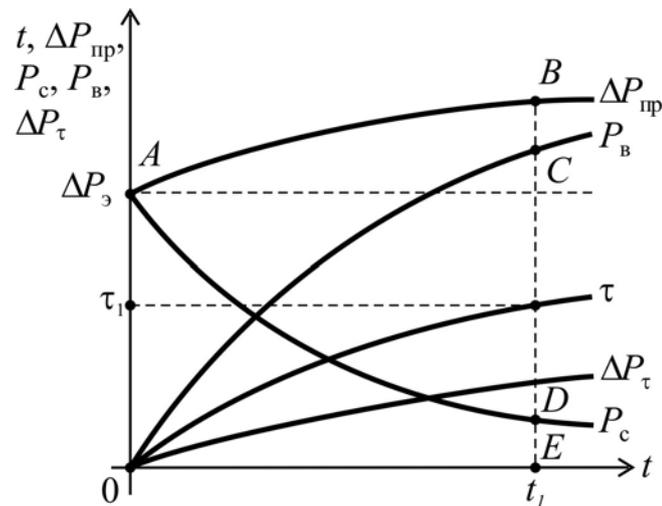


Рис. 1

Для возможности проведения количественного анализа влияния величины тока I на расход энергии на проведение испытания найдем зависимость $k_{эф} = f(I)$ в аналитическом виде по формуле (6).

Зависимость превышения температуры τ от времени t может быть представлена в виде [4]

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right), \quad (7)$$

где τ_{∞} – установившееся значение превышения температуры;

T_3 – эквивалентная постоянная времени нагревания.

Установившееся превышение температуры и эквивалентная постоянная времени могут быть найдены в виде [4]:

$$\tau_{\infty} = \frac{\Delta P_э}{B_{пр} - I^2 R_0 \alpha};$$

$$T_3 = \frac{C_{пр}}{B_{пр} - I^2 R_0 \alpha}. \quad (8)$$

При известном значении τ_1 время испытания t_1 , может быть найдено из формулы (7) в виде

$$t_1 = T_3 \cdot \ln \frac{\tau_{\infty}}{\tau_{\infty} - \tau_1}.$$

Найдем выражение для Q_B , взяв определённый интеграл

$$Q_B = B_{\text{пр}} \int_0^{t_1} \tau dt = B_{\text{пр}} \int_0^{t_1} \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}}\right) dt = B_{\text{пр}} (\tau_{\infty} \cdot t_1 - \tau_1 \cdot T_3). \quad (9)$$

Подставив выражения (5) и (9) для Q_C и Q_B соответственно в формулу (6), после преобразований получим

$$k_{\text{эф}} = \frac{\tau_1}{\tau_1 + (\tau_{\infty} \cdot t_1 - \tau_1 \cdot T_3) \cdot \frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}}. \quad (10)$$

Отношение $\frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}$ найдем из выражения (8) для T_3 в виде

$$\frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}} = \frac{1}{T_3} + \frac{\alpha \Delta P_3}{C_{\text{пр}}}. \quad (11)$$

Отношение $\Delta P_3 / C_{\text{пр}}$ может быть найдено из анализа уравнения (2) баланса мощностей для момента времени $t = 0$. Для этого момента времени справедливы выражения:

$$\Delta P_{\text{пр}} = \Delta P_3;$$

$$B_{\text{пр}} \cdot \tau = 0.$$

Тогда выражение (2) можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} \left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0}.$$

Производная $\frac{d\tau}{dt}$ в момент времени $t = 0$ может быть найдена из выражения (7) как

$$\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\tau_{\infty}}{T_3}.$$

Тогда справедливо равенство

$$\Delta P_3 = \frac{C_{\text{пр}} \tau_{\infty}}{T_3}.$$

Следовательно, отношение $\Delta P_3 / C_{\text{пр}}$ может быть найдено в виде

$$\frac{\Delta P_{\text{э}}}{C_{\text{пр}}} = \frac{\tau_{\infty}}{T_{\text{э}}}.$$

После соответствующих преобразований выражение (11) может быть записано как

$$\frac{B_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}} = \frac{1 + \tau_{\infty}\alpha}{T_{\text{э}}}. \quad (12)$$

Путём подстановки (12) в выражение (10) после преобразований получим

$$k_{\text{эф}} = \frac{T_{\text{э}} \cdot \tau_1}{\tau_{\infty} (t_1 + \alpha (\tau_{\infty} t_1 - \tau_1 T_{\text{э}}))}.$$

Величина, обратная $k_{\text{эф}}$, представляет собой отношение

$$\frac{1}{k_{\text{эф}}} = \frac{Q_{\text{р}}}{Q_{\text{с}}},$$

которое показывает во сколько раз полная энергия потерь в якоре тягового электродвигателя при его испытании больше энергии, затраченной на нагревание обмотки якоря.

В табл. 1 приведены результаты расчёта зависимостей $t_1 = f(I)$, $k_{\text{эф}} = f(I)$ и $1/k_{\text{эф}} = f(I)$, полученные для тягового электродвигателя НБ-406 с использованием тепловых характеристик его обмотки якоря ($\tau_1 = 120^{\circ}\text{C}$) [3].

Таблица 1

I, A	380	440	485	530	600
$t_1, \text{мин}$	56,5	28,9	20,4	14,9	10,4
$k_{\text{эф}}$	0,43	0,57	0,63	0,67	0,7
$1/k_{\text{эф}}$	2,32	1,75	1,59	1,5	1,42

3. Выводы

Из табл. 1 видно, что при испытаниях на нагревание тягового двигателя НБ-406 с силой тока нагрузки, близкой к пусковому значению (485 А), суммарные потери энергии в якоре почти в полтора раза ниже, чем при часовом режиме (380 А). При этом время тепловых испытаний уменьшается почти в три раза. Необходимо отметить, что электрические потери в других обмотках испытуемой электромашины при увеличении испытательного значения тока снижаются не в меньшей степени, чем потери в лимитирующей обмотке. Данные выводы будут справедливы и для других типов тяговых электродвигателей тягового подвижного состава.

Литература

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 50 с.
2. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287с.
4. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

References

1. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashayushiesya tyagovye* [State standard 2582-81. Hauling revolved electric machines]. State standard of USSR, Moskcow, 1981. 50 p.
2. Zakharchenko D. D. *Tyagovye elektricheskie mashiny i transformatory* [Hauling electric machines and transformers]. Moskcow, Transport, 1979. 303 p.
3. *Pravila tyagovih raschetov dlya poezdnoi raboty* [Rules of hauling calculations for train work]. Moskcow, Transport, 1985. 287 p.
4. Rozenfeld V. E. *Teoriya elektricheskoi tyagi* [Theory of electric traction]. Moskcow, Transport, 1983. 328 p.

The analysis of thermal processes in the puttees of hauling electric machines at their test on heating is resulted. The method of estimation of power efficiency of tests on heating is offered.

Keywords: hauling electric machine, tests, heating, exceeding of temperature, heat capacity, heat emission, power efficiency.

Афанасов Андрей Михайлович

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010

Контактный тел.: (056) 373-15-31

E-mail: afanasof@gmail.com

Афанасов Андрій Михайлович

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра «Електро рухомий склад залізниць»

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010

Контактний тел.: (056) 373-15-31

E-mail: afanasof@gmail.com

Afanasov Andrei
PhD, Associate Professor
Department "electrorolling of railways"
Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named. Academician
Lazarian
str. Lazarian, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010
Contact tel.: (056) 373-15-31
E-mail: afanasof@gmail.com