

9. Чайковська, С.С. Енергозберігаючі технології на рівні прийняття рішень [Текст] / С.С. Чайковська // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія "Нові рішення в сучасних технологіях". – Харків, 2012. – №33. – С.103 - 108.

### Abstract

The famous economic, exergic, thermoeconomic optimization methods do not take into account the changing of heat accumulation capacity of power systems. This complicates the coordination of the production and energy consumption and requires additional equipment. It was suggested to evaluate the changing of heat accumulation capacity on the basis of the information as a measure of reflection ratio of energy production and consumption in a single information space. This makes it possible to predict the change of the parameters of the technological process and not to eliminate the effects of their changes. Methodological and mathematical explanations of expert systems architecture were developed, using coordinated interaction of dynamic subsystem. Dynamic subsystem is the energy system as the base and units that predict the main stages of the technological process. The methodology of the mathematical formulation of the dynamics of power systems was worked out. The change of parameters is presented in both time and space coordinate along the axis of the heat exchanger, which coincides with the direction of flow. The graph of cause-and-effect relations was designed, to control operability and to identify the state of power systems. The thermodynamic basis of admission, as the structure and the principle of intelligent control of heat-mass exchanging processes, was formulated. The examples of the developed technologies and assessment of their effectiveness were represented

**Keywords:** energetic system, heat accumulation capacity, decision-making level

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 электромашинная, испытания, нагревание, превышение температуры, теплоёмкость, теплоотдача, энергетическая эффективность

УДК 621.313.001.4

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВАНИЯ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПРИ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

**А.М. Афанасов**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог»  
Днепропетровский национальный университет  
железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна  
ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010  
Контактный тел.: (056) 373-15-31  
E-mail: afanasof@gmail.com

## 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 температу-

ры, 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 электромашин, отдаётся в окружающую среду и не участвует в формировании теплового потенциала обмоток [2]. Целью же данных испытаний является нагрев обмоток тяговой электромашин 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]

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

где  $\Delta P_{np}$  – приведенные потери мощности;  
 $C_{np}$  – приведенная теплоёмкость;  
 $B_{np}$  – приведенная теплоотдача;  
 $\tau$  – превышение температуры;  
 $t$  – текущее время.

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

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

Введем обозначения для слагаемых правой части уравнения (2):

$$P_c = C_{np} \frac{d\tau}{dt};$$

$$P_b = B_{np} \tau.$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\Delta P_{np} = P_c + P_b. \quad (3)$$

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

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

где  $t_1$  – время испытания;

$\tau_1$  – превышение температуры на момент времени  $t_1$ .

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

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

$$\Delta P_{np} = I^2 R_o + I^2 R_o \alpha \tau + k_c \Delta P_c,$$

где  $R_o$  – сопротивление обмотки якоря при температуре окружающей среды;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$k_c$  – коэффициент, учитывающий влияние потерь в стали на нагрев обмотки якоря;

$\Delta P_c$  – потери мощности в стали.

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

$$\Delta P_{np} = \Delta P_o + \Delta P_\tau,$$

где  $\Delta P_o = I^2 R_o + k_c \Delta P_c$  – эквивалентные потери при  $\tau = 0$ ;

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

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

$$Q_p = \int_0^{t_1} \Delta P_{np} dt;$$

$$Q_c = C_{np} \tau_1;$$

$$Q_b = B_{np} \int_0^{t_1} \tau dt.$$

(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  $B_{np}$  до превышения температуры  $\tau_1$  за время  $t_1$ , то энергия  $Q_c$  – является полезной, то есть расходуемой только на повышение  $\tau$ . Отношение этой

энергии к полной энергии  $Q_p$  будет характеризовать энергетическую эффективность испытания на нагрев. Назовём это отношение коэффициентом энергетической эффективности  $k_{эф}$ .

$$k_{эф} = \frac{Q_c}{Q_p} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_v} \tag{6}$$

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

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

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

Площадь фигуры  $ABE0$  представляет собой полную тепловую энергию  $Q_p$  за время  $t_1$ . Площадь фигуры  $0CE$  является энергией  $Q_v$ , которая рассеяна в окружающую среду. Площадь фигуры  $ADE0$  представляет собой энергию  $Q_c$ , которая пошла на нагревание до превышения температуры  $\tau_1$ .

Предварительный анализ кривых на рис. 1 показывает, что с увеличением скорости нагревания  $\frac{d\tau}{dt}$

при фиксированном значении  $\tau_1$  энергия  $Q_v$  будет уменьшаться. А, следовательно, с ростом тока  $I$  коэффициент  $k_{эф}$  будет увеличиваться.

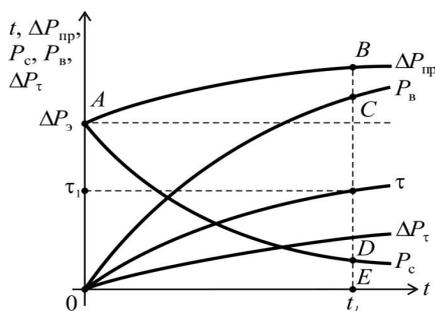


Рис. 1. Кривые изменения превышения температуры  $\tau$  и мощностей  $\Delta P_{пр}$ ,  $P_c$ ,  $P_v$

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  $\tau$  от времени  $t$  может быть представлена в виде [4]

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

где  $\tau_{\infty}$  – установившееся значение превышения температуры;

$T_3$  – эквивалентная постоянная времени нагревания.

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

$$\tau_{\infty} = \frac{\Delta P_3}{B_{пр} - \Gamma R_0 \alpha};$$

$$T_3 = \frac{C_{пр}}{B_{пр} - \Gamma R_0 \alpha} \tag{8}$$

При известном значении  $\tau_1$  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  $Q_v$ , взяв определённый интеграл

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

Подставив выражения (5) и (9) для  $Q_c$  и  $Q_v$  соответственно в формулу (6), после преобразований получим

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

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

$$\frac{B_{пр}}{C_{пр}} = \frac{1}{T_3} + \frac{\alpha \Delta P_3}{C_{пр}} \tag{11}$$

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

$$\Delta P_{пр} = \Delta P_3;$$

$$B_{пр} \cdot \tau = 0.$$

Тогда выражение (2) можно записать в виде

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

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

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

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

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

Таблица 1

После соответствующих преобразований выражение (11) может быть записано как

$$\frac{B_{np}}{C_{np}} = \frac{1 + \tau_{\infty} \alpha}{T_3} \quad (12)$$

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

$$k_{эф} = \frac{T_3 \cdot \tau_1}{\tau_{\infty} (t_1 + \alpha (\tau_{\infty} t_1 - \tau_1 T_3))}$$

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

$$\frac{1}{k_{эф}} = \frac{Q_p}{Q_c},$$

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

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

I, А	380	440	485	530	600
$t_1$ , мин	56,5	28,9	20,4	14,9	10,4
$k_{эф}$	0,43	0,57	0,63	0,67	0,7
$1/k_{эф}$	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 электромашин 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

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

### Abstract

*The research concerns railway transport and devoted to the analysis of heating processes during the testing of the heating of dynamoelectric machines of rolling stock. The aim of the research is the decrease of power consumption for the after-repair acceptable tests of dynamoelectric machines by optimization of loading conditions. The estimation method of power efficiency of heating tests with the help of the index is suggested in the work. It represents the power relation, expended for the temperature increase of armature coil of electric machine, and the relation to the full loss in armature during the testing. The result of the differential equation of armature coil heating was the analytical formula for determination of the coefficient of the heating power efficiency according to the thermal parameters of the tested electric machine. To decrease the total power expenditure it was suggested to hold the test at load current higher than the watch value. It was shown that the increase of load current of tested electric machines to starting value helps to decrease total costs in their armatures almost one and a half time in comparison with the watch mode*

**Keywords:** traction dynamoelectric machine, tests, heating, temperature excess, heat capacity, heat irradiation, power efficiency