

## РАСХОЖДЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ИСПЫТАНИИ НА НАГРЕВ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

*Наведено результати аналізу теплових процесів, які протікають в обмотках тягових електричних машин при їх випробуваннях на нагрів методом взаємного навантаження. Отримано аналітичні вирази, які дозволяють визначити ступінь розходження теплових навантажень обмоток якорів електромашин, що випробуються, за значенням їх к.к.д., питомих втрат потужності та відносного відхилення їх магнітних характеристик.*

*Приведены результаты анализа тепловых процессов, протекающих в обмотках тяговых электрических машин при их испытании на нагрев методом взаимной нагрузки. Получены аналитические выражения, позволяющие определить степень расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин по значениям их к.п.д., удельных потерь мощности и относительного отклонения их магнитных характеристик.*

### ВВЕДЕНИЕ

Требования соответствующих стандартов [1] и правил ремонта тягового подвижного состава [2, 3] предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой тяговой электромашин: либо вновь изготовленной, либо вышедшей из ремонта. Эти испытания представляют собой важную, неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции.

Качество технического контроля, проводимого при приёмо-сдаточных испытаниях тяговых электромашин, в конечном счёте, определяет надёжность и безотказность всего тягового средства, а, следовательно, и эффективность самих железнодорожных перевозок.

Одним из важных условий обеспечения качества испытаний на нагрев является равенство тепловых нагрузок лимитирующих обмоток обеих испытуемых электромашин, которая определяет корректность оценки результатов испытаний. Требование ГОСТ 2582-81 [1] в части токовой нагруженности обмоток испытуемых двигателя и генератора является формальным, так как не учитывает ни схемы испытания, ни то, какая из обмоток электромашин является лимитирующей [4]. Тем не менее, этот фактор, определяющий качество испытаний, должен учитываться при оптимизации структуры системы взаимного нагружения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин будет наблюдаться при использовании схем взаимной нагрузки либо с параллельным источником электрической мощности, либо с конвертором напряжения (тока) [5]. Положительная разница токов якорей испытуемых двигателя и генератора в данных схемах обусловлена необходимостью создания избыточного (небалансного) электромагнитного момента, обеспечивающего компенсацию потерь холостого хода или суммарных потерь мощности в системе взаимного нагружения [6]. Представим такую положительную разницу токов якорей в виде

$$\Delta I_{я} = I_{яд} - I_{яг},$$

где  $I_{яд}$  и  $I_{яг}$  – токи якорей испытуемого двигателя и генератора соответственно.

Относительная разница токов якорей испытуемых электромашин, приведенная к току якоря испытуемого двигателя, может быть определена в виде отношения

$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{я}}{I_{яд}} \quad (1)$$

или

$$K_{\Delta I} = 1 - K_{Iя},$$

где  $K_{Iя}$  – отношение токов якорей испытуемого генератора и двигателя.

$$K_{Iя} = \frac{I_{яг}}{I_{яд}}$$

Как показывают расчёты и опыт проведения испытаний, ток испытуемого генератора может изменяться в диапазоне

$$I_{яг} \in [0,8I_{ч}; I_{ч}],$$

где  $I_{ч}$  – часовое значение тока, которое при испытаниях устанавливается на электромашине, работающей в режиме двигателя.

Качество тепловых испытаний тяговых электромашин, испытуемых с расхождением токов  $\Delta I_{я}$ , может быть оценено разностью превышений температур обмоток якорей  $\Delta \tau_{я}$  или их отношением  $K_{\tau}$  в момент времени  $t_1$  окончания испытания при условии равенства тепловых параметров и условий охлаждения. Представим данные параметры в виде:

$$\Delta \tau_{я} \left( \begin{array}{c} \tau_{яд} \\ \tau_{яг} \end{array} \right); \quad K_{\tau} \left( \begin{array}{c} \tau_{яг} \\ \tau_{яд} \end{array} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_{яд}$  и  $\tau_{яг}$  – превышения температур обмоток якорей двигателя и генератора соответственно.

Относительная разность превышений температур якорей двигателя и генератора может быть представлена в виде

$$K_{\Delta \tau} \left( \begin{array}{c} \Delta \tau_{я} \\ \tau_{яд} \end{array} \right)$$

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

$$K_{\Delta T} \left( \frac{1}{T_3} \right) = 1 - K_{\tau_{я}} \left( \frac{1}{T_3} \right).$$

Целью данного исследования является определение аналитических выражений, позволяющих определить степень расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин по значениям к.п.д., удельных потерь мощности и относительного отклонения их магнитных характеристик.

Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин определяет характер распределения мощности между двумя источниками энергии системы взаимного нагружения, а в случае, если один из них является параллельным источником напряжения, и степень расхождения токовых нагрузок обмоток якорей [7].

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ОБМОТОК ЯКОРЕЙ

Изменение температуры обмотки якоря во времени при испытании может быть описано уравнением вида [8]

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

где  $\tau_{я\infty}$  – установившееся превышение температуры;  
 $T_3$  – эквивалентная постоянная времени нагревания.

Установившееся превышение и эквивалентная постоянная времени могут быть определены аналитически в виде [8]:

$$\tau_{я\infty} = \frac{\Delta P_3}{B_{пр} - I_{я}^2 R_0 \alpha};$$

$$T_3 = \frac{C_{пр}}{B_{пр} - I_{я}^2 R_0 \alpha},$$

где  $\Delta P_3$  – эквивалентные потери;  
 $B_{пр}$  – приведенная теплотдача;  
 $C_{пр}$  – приведенная теплоёмкость;  
 $R_0$  – сопротивление обмотки при нулевом превышении температуры;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Эквивалентные потери  $\Delta P_3$  с допустимой степенью упрощения могут быть приняты пропорциональными квадрату тока якоря

$$\Delta P_3 \sim I_{я}^2.$$

Зависимости  $\tau_{я\infty}(I_{я})$  и  $T_3(I_{я})$  являются тепловыми характеристиками тяговой электромашин, относятся к типовым и, в принципе, известны для каждого типа тягового двигателя [4]. Эти характеристики также могут быть построены по кривым нагревания обмоток тяговой электромашин, которые снимаются при квалификационных испытаниях и являются частью протоколов этих испытаний [1].

Исходя из своей природы, зависимость  $\tau_{я\infty}(I_{я})$  должна достаточно хорошо описываться аналитически функцией вида

$$\tau_{я\infty} = \frac{I_{я}^2}{a - bI_{я}^2},$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты.

Однако, как показывает анализ тепловых характеристик реальных тяговых двигателей [4], данная функция достаточно точно описывает зависимость  $\tau_{я\infty}(I)$  только на отдельных отрезках изменения тока. Для многих тяговых двигателей электроподвижного состава более точно данная характеристика описывается в окрестностях точки часового режима более простой функцией вида

$$\tau_{я\infty} = a \cdot I_{я}^2.$$

Зависимость  $T_3(I)$  является менее выраженной, чем  $\tau_{я\infty}(I)$ . В тяговых расчетах при определении превышения температуры обмоток якорей значение постоянной времени  $T_3$  для тяговых двигателей электропоездов вообще принимается постоянной, не зависящей от тока [4].

$$T_3 = \text{const}.$$

Если принять допущение, что на ожидаемом интервале изменения тока  $I_{я\Gamma} \in [0,8I_{ч}; I_{ч}]$  установившееся превышение температуры  $\tau_{я\infty}$  пропорционально квадрату тока якоря  $I_{я}$ , а постоянная времени нагревания  $T_3$  неизменна, то отношение температур обмоток якорей по формуле (2) в любой момент времени с допустимой степенью упрощения можно принять постоянным и равным

$$K_{\tau_{я}} = \frac{\tau_{я\Gamma\infty}}{\tau_{я\Delta\infty}} = \frac{I_{я\Gamma}^2}{I_{я\Delta}^2} = K_{I_{я}}^2, \quad (3)$$

где  $\tau_{я\Gamma\infty}$  и  $\tau_{я\Delta\infty}$  – установившиеся превышения температур якорей испытуемых генератора и двигателя соответственно.

Таким образом, отношение превышений температур обмоток якорей испытуемых электромашин будет равно отношению их тепловых факторов.

Для схем взаимного нагружения с одним параллельным источником электрической мощности выражение для разницы токов якорей испытуемых электромашин будет иметь вид [7]

$$\Delta I_{я} = \frac{\sum \Delta P}{E_{д}}, \quad (4)$$

где  $\sum \Delta P$  – суммарные потери мощности испытуемых электромашин;

$E_{д}$  – э. д. с. испытуемого двигателя.

Для систем взаимного нагружения с двумя источниками мощности, одним из которых является источник электрической мощности, включенный параллельно, разница токов якорей испытуемых электромашин будет иметь вид [9]

$$\Delta I_{я} = \frac{\sum \Delta P_{xx} - \Delta E I_{я\Gamma}}{E_{д}}, \quad (5)$$

где  $\sum \Delta P_{xx}$  – суммарные потери холостого хода испытуемых электромашин;

$\Delta E$  – разница э. д. с. испытуемого двигателя  $E_{д}$  и генератора  $E_{г}$ , обусловленная расхождением их магнитных характеристик.

$$\Delta E = E_{д} - E_{г}.$$

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с одним источником, полученная

по формуле (1) с учётом выражения (4), будет определяться в виде

$$I'_{\Delta I} = \sum \Delta p, \quad (6)$$

где  $\sum \Delta p$  – полные суммарные приведенные потери мощности испытуемых электромашин.

$$\sum \Delta p = \frac{\sum \Delta P}{P_{\text{эмд}}},$$

где  $P_{\text{эмд}}$  – электромагнитная мощность испытуемого двигателя.

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с двумя источниками, полученная по формуле (1) с учётом выражения (5), будет определяться выражением

$$K''_{\Delta I} = \sum \Delta p_{\text{xx}} - K_{Iя} \cdot \Delta E^*, \quad (7)$$

где  $\sum \Delta p_{\text{xx}}$  – суммарные приведенные потери холостого хода испытуемых электромашин;

$\Delta E^*$  – приведенная разность э. д. с. электромашин, обусловленная расхождением их магнитных характеристик.

$$\sum \Delta p_{\text{xx}} = \frac{\sum \Delta P_{\text{xx}}}{P_{\text{эмд}}};$$

$$\Delta E^* = \frac{\Delta E}{E_d}.$$

Минимальное значение отрицательной приведенной разности э. д. с. испытуемых электромашин может быть принято равным

$$\Delta E^* = -2\Delta \bar{n}^*, \quad (8)$$

где  $\Delta \bar{n}^*$  – максимально допустимое положительное отклонение частоты вращения электромашин от типового значения часовой частоты вращения.

С допустимой степенью упрощения можно принять относительные разницы токов электромашин для двух вариантов схемы взаимного нагружения:

$$K'_{\Delta I} = \sum \Delta p;$$

$$K''_{\Delta I} = \sum \Delta p_{\text{xx}} + 2\Delta \bar{n}^*,$$

где  $\sum \Delta p$  и  $\sum \Delta p_{\text{xx}}$  – полные потери и потери холостого хода соответственно, приведенные к часовой мощности.

$$\sum \Delta p = \frac{\sum \Delta P}{P_{\text{ч}}};$$

$$\sum \Delta p_{\text{xx}} = \frac{\sum \Delta P_{\text{xx}}}{P_{\text{ч}}},$$

где  $P_{\text{ч}}$  – мощность часового режима испытуемых электромашин.

Отношения токов якорей, выраженные через приведенные потери, с учётом формул (6)-(8) будут иметь вид:

$$K'_{Iя} = 1 - \sum \Delta p;$$

$$K''_{Iя} = 1 - \sum \Delta p_{\text{xx}} - 2\Delta \bar{n}^*.$$

Тогда отношения тепловых факторов для двух вариантов схемы взаимного нагружения с учётом выражения (3):

$$K'_{\text{тя}} = \left( - \sum \Delta p \right)^2; \quad (9)$$

$$K''_{\text{тя}} = \left( - \sum \Delta p_{\text{xx}} - 2\Delta \bar{n}^* \right)^2. \quad (10)$$

Для тяговых двигателей электровозов и электропоездов  $\Delta \bar{n}^* = 0,03$  [1]. Тогда выражение для отношения тепловых факторов обмоток якорей при варианте с двумя источниками мощности будем иметь в виде

$$K''_{\text{тя}} = \left( - \sum \Delta p_{\text{xx}} - 0,06 \right)^2.$$

В расчетах можно принять:

$$\sum \Delta p = 2\Delta p;$$

$$\sum \Delta p_{\text{xx}} = 2\Delta p_{\text{xx}},$$

где  $\Delta p$  – полные приведенные потери одной испытуемой электромашин;

$\Delta p_{\text{xx}}$  – приведенные потери холостого хода одной испытуемой электромашин.

Необходимо отметить, что отношение тепловых факторов обмоток якорей электромашин, испытуемых по схеме взаимного нагружения с одним последовательным источником электрической мощности и конвертором напряжения [6] будет определяться по формуле, аналогичной выражению (10).

Приведенные потери одной электромашин могут быть определены в виде:

$$\Delta p = 1 - \eta_{\text{ч}}; \quad (11)$$

$$\Delta p_{\text{xx}} = 1 - \eta_{\text{ч}} - \Delta p_{\text{э}}, \quad (12)$$

где  $\eta_{\text{ч}}$  – к. п. д. испытуемых электромашин в часовом режиме;

$\Delta p_{\text{э}}$  – приведенные электрические потери одной испытуемой электромашин.

$$\Delta p_{\text{э}} = \frac{I^2 \sum R}{P_{\text{ч}}}, \quad (13)$$

где  $\sum R$  – суммарное сопротивление обмоток одной испытуемой электромашин.

Здесь необходимо отметить, что при определении удельных потерь  $\Delta p_{\text{xx}}$  по формуле (12) необходимо использовать параметры  $\eta_{\text{ч}}$  и  $\sum R$ , соответствующие нагретому состоянию тяговой электромашин. В принципе значение удельных потерь холостого хода  $\Delta p_{\text{xx}}$  может быть определено из протоколов приёмосдаточных испытаний тяговых электрических машин соответствующих типов.

В табл. 1 приведены результаты расчётов отношений тепловых факторов  $K'_{\text{тя}}$  и  $K''_{\text{тя}}$ , проведенных для некоторых типов тяговых двигателей электровозов и электропоездов [4] с использованием полученных в анализе выражений (9)-(13).

Таблица 1

Тип ТЭД	НБ-406	НБ-418К	УРТ-110А	РТ-51Д
$K'_{\text{тя}}$	0,71	0,789	0,673	0,672
$K''_{\text{тя}}$	0,754	0,823	0,776	0,854

## ВЫВОДЫ

Из таблицы 1 видно, что для тяговых двигателей с большой долей потерь холостого хода возможное

расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей при испытании на нагрев методом взаимной нагрузки весьма существенно даже при использовании схемы с двумя источниками, один из которых является параллельным источником электрической мощности.

При использовании схемы с одним параллельным источником электрической мощности возможное расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей испытываемых электромашин недопустимо с точки зрения обеспечения качества испытаний на нагрев.

При максимально допустимом расхождении магнитных характеристик электромашин [1] тепловой фактор обмотки якоря генератора при испытании по схеме с вольтодобавочной машиной и линейным генератором [7] может быть на 25% меньше теплового фактора обмотки якоря двигателя (НБ-406). При таких условиях с вероятностью, равной 0,5, могут быть признаны успешными испытания на нагрев тяговой электромашин (испытываемой на стенде в режиме генератора) с недопустимо завышенным значением превышения температуры в часовом режиме на 25%.

Решение проблемы расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей и повышения качества испытаний на нагрев тяговых электрических машин может быть достигнуто за счёт отказа от использования в системах взаимного нагружения параллельного источника электрической мощности и конвертора напряжения (тока) [6, 10].

Полное совпадение тепловых нагрузок всех обмоток испытываемых электромашин может наблюдаться только в случае использования системы взаимной нагрузки с электрическим способом компенсации электрических потерь и механическим способом компенсации потерь холостого хода [7].

При использовании классической схемы взаимной нагрузки с вольтодобавочной машиной и линейным генератором значение превышения температуры якоря электромашин, испытываемой в режиме генератора, должно корректироваться по реальному значению тока генератора, измеренному при проведении испытаний на нагрев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.

2. Правила ремонту электрических машин электровозів і електропоїздів. № ЦТ-0063. Затверджено і введено в дію наказом Міністерства транспорту України № 53-Ц від 27.02.2003 р. – К.: Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
3. Правила ремонту электрических машин тепловозів. № ЦТ-0064. Затверджено і введено в дію наказом Міністерства транспорту України № 53-Ц від 27.02.2003 р. – К.: Видавничий дім «САМ», 2003. – 122 с.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287с.
5. Афанасов, А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дн. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В.Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 27. – С. 42-46.
6. Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока // Наук.-техн. збір. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
7. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
8. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
9. Афанасов А.М. К вопросу о выборе мощности источников питания стенда взаимной нагрузки тяговых электромашин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 27. – С. 3-9.
10. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

Поступила 23.01.2014

*Афанасов Андрей Михайлович, к.т.н, доц.*  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, Украина, 49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@gmail.com.