

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МАГИСТРАЛЬНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Системы взаимного нагружения используются для проведения послеремонтных приемо-сдаточных испытаний тяговых двигателей электроподвижного состава (ЭПС) магистрального и промышленного транспорта. Целью данного исследования является обоснование метода выбора рациональных параметров взаимного нагружения тяговых электрических двигателей при их испытании на нагрев. **Методика.** В основе обоснования принципа выбора рациональных параметров взаимного нагружения тяговых электродвигателей лежит теория нагревания однородного твердого тела и известные методы тепловых расчетов тяговых электромашин. **Результаты.** Обоснована целесообразность проведения испытаний тяговых электрических двигателей на нагрев при токах нагрузки, равных пусковому току (для ЭПС магистрального транспорта) или пятнадцатиминутному току (для ЭПС промышленного транспорта). Показано, что такое увеличение тока нагрузки позволит снизить расходы электроэнергии на испытания на 20–30 % и сократить длительность испытаний в три–четыре раза при обеспечении минимума приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения. **Научная новизна.** Показано, что энергетические затраты на проведение испытаний тяговых двигателей на нагрев могут быть снижены как за счет повышения энергетической эффективности системы взаимной нагрузки, так и путем оптимизации режима нагружения тяговых электромашин. Обоснована методика выбора рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта. **Практическая значимость.** Повышение тока нагрузки тяговых электрических двигателей при их испытании на нагрев позволит снизить общий расход электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний, снизить время проведения испытаний и суммарные материальные затраты на ремонт тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Ключевые слова: электроподвижной состав; тяговый двигатель; взаимное нагружение; испытание на нагрев; энергетическая эффективность; ток нагрузки; рациональность; тепловые характеристики

Введение

Снижение расхода электроэнергии на проведение приемо-сдаточных послеремонтных испытаний тяговых электромашин является одной из актуальных проблем на предприятиях по ремонту тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта. Испытания на нагрев тяговых электромашин на

стенде взаимной нагрузки [4] являются наиболее энергоемкой частью всей программы испытаний. Энергетические затраты на проведение данного вида испытаний могут быть снижены как за счет повышения энергетической эффективности системы взаимной нагрузки, так и путем оптимизации режима нагружения тяговых электромашин [11–13].

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Цель

Целью данного исследования – обоснование метода выбора рациональных параметров взаимного нагружения тяговых электрических двигателей при их испытании на нагрев.

Методика

Режим нагружения тяговых электромашин при испытании на нагрев характеризуется такими параметрами как [3]:

- напряжение на коллекторе;
- ток нагрузки;
- коэффициент ослабления поля;
- расход охлаждающего воздуха.

Рассмотрим каждый из этих параметров с точки зрения возможности их влияния на рациональность режима нагружения тяговых электромашин при их испытании. В качестве критериев рациональности будем рассматривать:

- минимум суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда;
- максимум энергетической эффективности процесса испытания;
- максимум качества испытаний.

Напряжение на коллекторе. По требованиям ГОСТ 2582-81 [3] испытания на нагрев тяговых электродвигателей необходимо проводить при номинальном напряжении. При этом частота вращения испытуемых на стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин определяется током нагрузки и их электромеханическими характеристиками. При отклонении реальных магнитных характеристик испытуемых электромашин от типовой магнитной характеристики их частоты вращения при номинальном напряжении будут отличаться от значения, соответствующего (по типовой электромеханической характеристике) номинальному или часовому току.

Результаты исследований, проведенных в работе [1], показывают, что изменения испытательного напряжения в узких пределах ($\pm 5\%$) не оказывают заметного влияния на характер протекания тепловых процессов в обмотках испытуемых электромашин. Следовательно, при проведении испытания на нагрев нет необходимости в жесткой стабилизации испытательного напряжения на уровне номинального значения. Более рациональным с точки зрения управляемости системы взаимного нагружения

будет стабилизация частоты вращения якорей испытуемых электромашин на значении, соответствующем току нагрузки электромашин по ее типовой электромеханической характеристике.

С другой стороны, обеспечение величины напряжения на коллекторе, близкого к номинальному значению, при проведении испытания на нагрев является условием качественной проверки потенциальных условий на коллекторе и устойчивости против дугообразования. Таким образом, испытательное напряжение не может рассматриваться как параметр, варьированием которого можно влиять на рациональность режима испытания.

По сути, требование к напряжению на коллекторе испытуемой тяговой электромашин является ограничением в задаче выбора рационального режима нагружения.

Коэффициент ослабления поля. Как по требованиям ГОСТ 2582-81, так и с точки зрения обеспечения качества испытаний на нагрев коэффициент ослабления поля при проведении данного испытания должен быть равным номинальному значению. При выполнении проверки коммутации коэффициент ослабления поля должен быть принят минимальным, что обусловлено требованиями к качеству данной проверки [3, 10].

Требование к значению коэффициента ослабления поля, как и требование к испытательному напряжению, является ограничением в задаче выбора рационального режима нагружения.

Расход охлаждающего воздуха. Как ГОСТ 2582-81 [3], так и правила ремонта тяговых электромашин [10] допускают при согласовании с заказчиком проведение испытаний на нагрев при расходе охлаждающего воздуха, меньшем номинального, в том числе, и без вентиляции. При этом эквивалентные значения тока нагрузки испытуемых электромашин устанавливаются меньше часового и длительного токов. Это обусловлено нагреванием частей испытуемой электромашин за один час времени испытания до значений превышения температуры, соответствующих данному превышению в номинальном режиме [6].

Экономический эффект от внедрения такого метода испытания на нагрев обуславливается экономией электроэнергии, расходуемой на вентиляцию и отсутствием необходимости наличия вентиляционной системы на испыта-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тельной станции. Следует отметить, что испытание на нагрев без вентиляции еще и повышает энергетическую эффективность нагревания обмоток электромашин за счет снижения энергии теплоотдачи [2].

Существенным недостатком испытания на нагрев без вентиляции является отсутствие проверки эффективности охлаждения частей электромашин, которая определяется мощностью теплоотдачи. При таком методе испытания малое влияние на характер теплообменных процессов оказывают тепловые сопротивления конвективной и кондуктивной теплоотдачи, а также аэродинамическое сопротивление электромашин [5, 9]. Все это приводит к снижению качества испытаний на нагрев.

Еще одним существенным недостатком испытания на нагрев без вентиляции, снижающим качество испытания, является работа испытуемых электромашин при эквивалентных токах, значительно меньших часового и длительного тока электромашин. При таких условиях нагружения снижается качество проверки устойчивости против дугообразования в течение испытания на нагрев. Несмотря на то, что целью испытаний на нагрев является определение превышения температуры частей тяговой электромашин, определенная часть случаев браковки тяговых двигателей связана как раз с появлением кругового огня во время данного испытания.

Возможным преимуществом проведения испытания на нагрев без вентиляции могла бы быть меньшая приведенная суммарная мощность источников испытательного стенда [7, 8], но ГОСТом 2582-81 [3] предусмотрена проверка коммутации, для которой требуется возможность установления тока нагрузки нагретых электромашин, равным пусковому току. Следовательно, в диапазоне изменения от нуля до пускового значения величина тока нагрузки, выбираемая для проведения испытания на нагрев, на величину суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда не влияет.

Ток нагрузки. По требованиям ГОСТ 2582-81 [3] ток нагрузки электромашин при испытании на нагрев должен быть принят равным часовому значению. При этом и ГОСТ 2582-81 [3], и правила ремонта тяговых электромашин [10] допускают проведение испытания при эквива-

лентных токах, дающих превышения температур обмоток электромашин, соответствующих длительному режиму [6].

Одним из критериев выбора рационального режима нагружения тяговых электромашин при их испытании на нагрев является максимум коэффициента энергетической эффективности процесса нагревания обмоток электромашин. Как показали результаты предварительных исследований [2], величина тока нагрузки существенно влияет на энергетическую эффективность испытания на нагрев и общий расход электроэнергии на данное испытание. Проведем анализ выражения для коэффициента энергетической эффективности процесса нагревания $k_{эфн}$, определяющего общий расход электроэнергии на испытания [2].

$$k_{эфн} = \frac{T_3 \tau_1}{\tau_\infty (t_1 + \alpha(\tau_\infty t_1 - \tau_1 T_3))}, \quad (1)$$

где T_3 – эквивалентная постоянная времени нагревания; τ_1 – превышение температуры обмотки в конце испытания; τ_∞ – установившееся превышение температуры; t_1 – время испытания на нагрев; α – температурный коэффициент сопротивления.

Время проведения испытаний на нагрев определяется формулой [6]

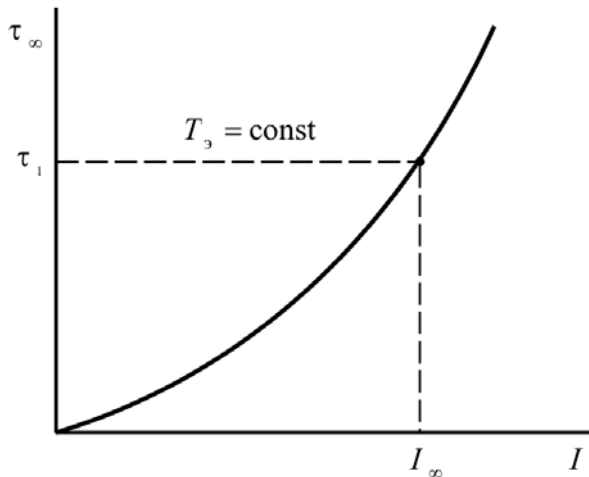
$$t_1 = T_3 \ln \frac{\tau_\infty}{\tau_\infty - \tau_1}. \quad (2)$$

Значение превышения температуры τ_1 в соответствии с ГОСТ 2582-81 [3] принимается равным максимально допустимому значению, соответствующему классу нагревостойкости изоляции и части электрической машины (якорь, полюса). Для большинства типов тяговых электромашин лимитирующей по нагреву является обмотка якоря [9], поэтому в дальнейшем будем рассматривать превышение температуры именно этой обмотки. Общий подход к выбору рационального режима нагружения тяговых двигателей, для которых лимитирующими являются обмотки возбуждения, будет аналогичным.

В формуле (1) параметрами, определяющими критерий энергетической эффективности $k_{эфн}$, являются значения τ_∞ и T_3 . Эквивалент-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ная постоянная времени T_3 для тяговых двигателей электровозов и тяговых агрегатов может приниматься постоянной и независимой от тока нагрузки. А установившееся превышение температуры τ_∞ является функцией тока нагрузки, которую можно считать известной для каждого типа тягового двигателя [5]. Характер такой зависимости приведен на рис. 1.

Рис. 1. Характер зависимости $\tau_\infty(I)$ Fig. 1. Type of the dependence $\tau_\infty(I)$

Из анализа формул (1) и (2) можно сделать вывод, что при токе нагрузки I , для которого $\tau_\infty(I) < \tau_1$, время испытания t_1 стремится к бесконечности, а коэффициент энергетической эффективности $k_{\text{эфн}}$ равен нулю.

Условие $\tau_\infty(I) < \tau_1$ соответствует неравенству

$$I < I_\infty,$$

где I_∞ – длительный ток тягового электродвигателя (рис. 1).

Тогда будет иметь место выражение

$$t_1 \rightarrow \infty, k_{\text{эфн}} = 0 \text{ при } I < I_\infty.$$

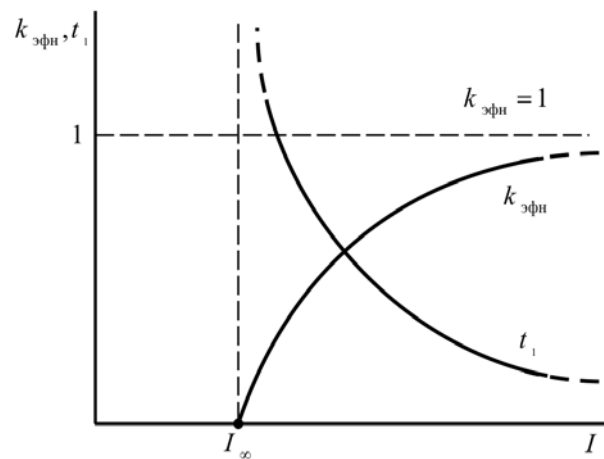
При росте тока нагрузки I и соответствующем росте превышения температуры τ_∞ время испытания t_1 уменьшается, а коэффициент энергетической эффективности $k_{\text{эфн}}$ увеличивается.

При стремлении значений I и τ_∞ к бесконечности время испытания t_1 стремится к нулю, а коэффициент энергетической эффектив-

ности $k_{\text{эфн}}$ – к единице. Прямая линия $k_{\text{эфн}} = 1$ является асимптотой для характеристики $k_{\text{эфн}}(I)$.

$$\lim_{I \rightarrow \infty} t_1 = 0; \lim_{I \rightarrow \infty} k_{\text{эфн}} = 1.$$

Характеры зависимостей $k_{\text{эфн}}(I)$ и $t_1(I)$ графически представлены на рис. 2.

Рис. 2. Характеры зависимостей $k_{\text{эфн}}(I)$ и $t_1(I)$ Fig. 2. Types of the dependences $k_{\text{эфн}}(I)$ and $t_1(I)$

Другим критерием рациональности режима нагружения является минимум суммарной приведенной мощности источника испытательного стенда. Этот же критерий должен быть использован при выборе рациональных схем нагружения испытуемых электромашин. Наиболее целесообразным с точки зрения минимума суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда является использование одного источника. При использовании одного источника расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин на величину максимальной приведенной мощности источника не влияет. Тогда максимальная приведенная мощность источника испытательного стенда

$$\sum \bar{p}_n = \frac{2}{\eta}(1 - \eta), \quad (3)$$

где η – к. п. д. испытуемых электромашин.

К. п. д. испытуемых электромашин является функцией тока нагрузки и максимален для большинства тяговых двигателей в точке, соответствующей длительному режиму [5, 9]. Каче-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ственно характеристика $\eta(I)$ приведена на рис. 3. На этом же рисунке качественно показан характер зависимости $\sum \bar{p}_{и}(I)$, который соответствует выражению (3).

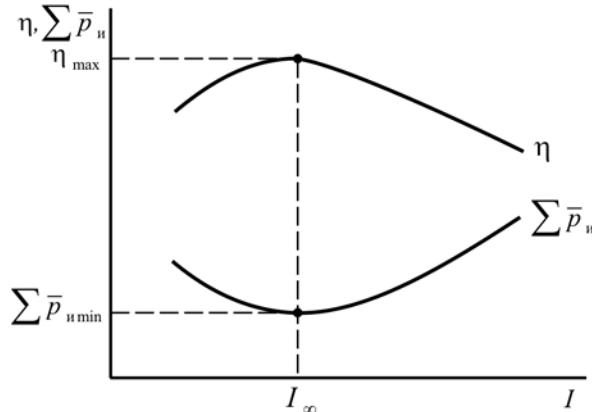


Рис. 3. Характеры зависимостей $\eta(I)$ и $\sum \bar{p}_{и}(I)$

Fig. 3. Types of the dependences $\eta(I)$ and $\sum \bar{p}_{и}(I)$

Результаты

Из рис. 3 видно, что зависимость $\sum \bar{p}_{и}(I)$ на интервале изменения тока нагрузки $I \in [I_{\infty}; \infty)$ – монотонно возрастающая. То есть, увеличение тока нагрузки I при испытании ведет к возрастанию $\sum \bar{p}_{и}$.

На рис. 4 на одной координатной плоскости качественно показаны зависимости двух показателей рациональности режима испытания, $k_{эфн}$ и $\sum \bar{p}_{и}$, от тока нагрузки I . Из графиков (рис. 4) видно, что в диапазоне изменения тока нагрузки $I \in [I_{\infty}; \infty)$ улучшение одного из показателей приводит к ухудшению другого. Уменьшение приведенной мощности источника приводит к уменьшению энергетической эффективности и наоборот.

Минимально допустимым значением приведенной мощности является $\sum \bar{p}_{и}(I_{пущк})$. Это обусловлено необходимостью проверки коммутации при пусковом токе. Таким образом, диапазон изменения тока I , в котором следует искать рациональное его значение, может быть представлен в виде

$$I \in [I_{пущк}; \infty).$$

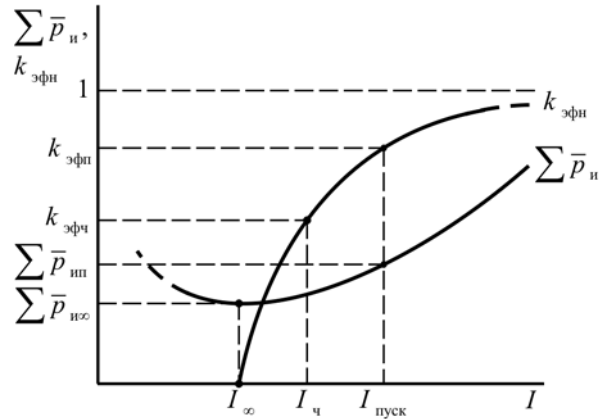


Рис. 4. Определение рационального тока нагрузки

Fig. 4. Determination of rational load current

Анализ зависимостей $k_{эфн}(I)$, полученных для реальных типов тяговых электродвигателей [2], показывает, что увеличение тока нагрузки от часового до пускового значения приводит к повышению $k_{эфн}$ приблизительно в 1,5 раза.

Время проведения испытания на нагрев при пусковом токе нагрузки уменьшается почти в три раза в сравнении с часовым режимом.

Дальнейшее повышение тока нагрузки, например, до $2I_{ч}$, приводит к незначительному росту $k_{эфн}$ и существенному увеличению $\sum \bar{p}_{и}$. С данной точки зрения наиболее рациональным будет значение тока нагрузки при испытании на нагрев, равное пусковому току

$$I_{рац} = I_{пущк}.$$

При испытании на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава промышленного транспорта (тяговых агрегатов) наиболее рациональным будет значение тока нагрузки, соответствующее пятнадцатиминутному режиму, который для данного типа тяговых двигателей является типовым параметром

$$I_{рац} = I_{15}.$$

Научная новизна и практическая ценность

Показано, что энергетические затраты на проведение испытаний тяговых двигателей на нагрев могут быть снижены как за счет повышения энергетической эффективности системы

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

взаимной нагрузки, так и путем оптимизации режима нагружения тяговых электромашин. Обоснована методика выбора рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Повышение тока нагрузки тяговых электрических двигателей при их испытании на нагрев позволит снизить общий расход электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний, снизить время проведения испытаний и суммарные материальные затраты на ремонт тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Выводы

Наиболее целесообразным является проведение испытаний тяговых электрических двигателей на нагрев при токах нагрузки, равных пусковому току (для ЭПС магистрального транспорта), или пятнадцатиминутному току (для ЭПС промышленного транспорта). Использование таких токов нагрузки тяговых двигателей позволит снизить расходы электроэнергии на их испытания на 20–30 % и сократить длительность испытаний в три – четыре раза при обеспечении минимума приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Афанасов, А. М. Качественный анализ электрических и магнитных потерь в якорях тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // *Вісн. НТУ «ХП»*. – Х., 2010. – № 36. – С. 13–18.
- Афанасов, А. М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // *Восточно-европ. журн. передовых технологий*. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 6–9.
- ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
- Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
- Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины : учеб. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М. : Транспорт, 1991. – 343 с.
- Лоза, П. О. Визначення еквівалентного струму навантаження при випробовуванні тягових електродвигунів на нагрівання без вентиляції / П. О. Лоза, Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2008. – Вип. 25. – С. 26–29.
- Лоза, П. О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2008. – Вип. 22. – С. 69–71.
- Лоза, П. О. Покращення енергетичних та інших показників приймально-здавальних випробувань тягових двигунів електровозів / П. О. Лоза // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2009. – Вип. 27 – С. 81–83.
- Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка, В. П. Янов. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
- Правила ремонту электрических машин электровозів і електропоїздів. ЦТ-0204. – К. : Вид. дім «САМ», 2012. – 286 с.
- Castaneda, C. E. Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor With Controlled Flux / C. E. Castaneda, A. G. Loukianov, E. N. Sanchez // *IEEE Transactions. Industrial Electronics*. – 2012. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 1194–1206. doi: 10.1109/tie.2011.2161246.
- El Hayek, J. Experiences with a traction drive laboratory model / J. El Hayek, T. J. Sobczyk, G. Skarpetowski // *Electromotion*. – 2010. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 30–36.
- Liu, Y. Developments in Switching Mode Supply Technologies / Y. Liu, W. Eberle // *IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies*. Fall. – 2009. – № 61. – P. 9–14.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

А. М. АФАНАСОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Системи взаємного навантаження використовуються для проведення післяремонтних приймально-здавальних випробувань тягових двигунів електрорухомого складу (ЕРС) магістрального та промислового транспорту. Метою даного дослідження є обґрунтування методу вибору раціональних параметрів взаємного навантаження тягових електричних двигунів при їх випробуванні на нагрів. **Методика.** В основі обґрунтування принципу вибору раціональних параметрів взаємного навантаження тягових електродвигунів лежить теорія нагрівання однорідного твердого тіла та відомі методи теплових розрахунків тягових електромашин. **Результати.** Обґрунтовано доцільність проведення випробувань тягових електричних двигунів на нагрів при струмах навантаження, рівних пусковому струму (для ЕРС магістрального транспорту) або п'ятнадцятихвилинному (для ЕРС промислового транспорту). Показано, що таке збільшення струму навантаження дозволить знизити витрати електроенергії на випробування на 20–30 % і скоротити тривалість випробувань у тричотири рази при забезпеченні мінімуму приведеної потужності джерел живлення системи взаємного навантаження. **Наукова новизна.** Показано, що енергетичні витрати на проведення випробувань тягових двигунів на нагрів можуть бути знижені як за рахунок підвищення енергетичної ефективності системи взаємного навантаження, так і шляхом оптимізації режиму навантаження тягових двигунів електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту. **Практична значимість.** Підвищення струму навантаження тягових електричних двигунів при їх випробуванні на нагрів дозволить знизити загальну витрату електроенергії на проведення приймально-здавальних випробувань, знизити час проведення випробувань і сумарні матеріальні витрати на ремонт тягових двигунів електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту.

Ключові слова: електрорухомий склад; тяговий двигун; взаємне навантаження; випробування на нагрів; енергетична ефективність; струм навантаження; раціональність; теплові характеристики

А. М. AFANASOV^{1*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

RATIONAL MODES DETERMINATION OF TRACTION MOTORS LOADING-BACK FOR ELECTRIC ROLLING STOCK IN MAINLINE AND INDUSTRIAL TRANSPORT

Purpose. Loading-back systems are used for post-maintenance acceptance tests of electric traction motors of electric rolling stock (ERS) in mainline and industrial transport. The aim of the research is justification of choice method of the rational loading-back parameters of traction electric motors during the tests for heating. **Methodology.** At the heart of the choice method justification of the rational loading-back parameters is a theory of heating the homogeneous solid body and well-known methods of heating calculations of traction electric machines. **Findings.** Expediency of heating tests for electric traction motors at load currents equal to the starting current (for ERS of mainline transport) or fifteen minutes current (for ERS of industrial transport) was substantiated. It was shown that this increase of load current will reduce the electricity costs of the tests for 20–30% and shorten the tests duration for three–four times while ensuring the corrected power minimum of energy sources in loading-back system. **Originality.** It is shown that the energy costs for heating tests of the traction motors can be reduced by both the increasing the energy efficiency of the loading-back system and by the optimizing of loading mode of traction electric machines. Choice technique of rational modes of loading-back for electric traction motors of rolling stock in mainline and industrial transport was grounded.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Practical value. Load current increase of traction electric motors during their tests for heating will reduce the total electricity consumption for the acceptance tests, reduce test time and total material costs for repair of the electric traction motors of rolling stock in mainline and industrial transport.

Keywords: electric rolling stock; traction motor; loading-back; test for heating; energy efficiency; load current; rationality; thermal characteristics

REFERENCES

1. Afanasov A.M. Kachestvennyy analiz elektricheskikh i magnitnykh poter v yakoryakh tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo toka [Quality analysis of electric and magnetic losses in the anchors of traction electric machines of direct current]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut»* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»], 2012, no. 36, pp. 13-18.
2. Afanasov A.M. Energeticheskaya effektivnost nagrevaniya obmotok tyagovykh elektromashin pri priyemodatoknykh ispytaniyakh [The energy efficiency of the heating of electric traction coverings in acceptance tests]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern-European Journal of High Technologies*, 2012, no. 5/8 (59), pp. 6-9.
3. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya tyagovyye. Obshchiye tekhnicheskoye usloviya* [State Standard 2582-81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 34 p.
4. Zherve G.K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial tests of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
5. Zakharchenko D.D., Rotanov D.D. *Tyagovyye elektricheskoye mashiny* [Traction electric machines]. Moscow, Transport Publ., 1991. 343 p.
6. Loza P.O., Dubynets L.V., Ustymenko D.V. Vyznachennia ekvivalentnoho strumu navantazhennia pry vyprovovuvanni tiahovykh elektrodvyhuniv na nahrivannia bez ventyliatsii [Determination of equivalent current load under traction motors tests for heating without ventilation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 26–29.
7. Loza P.O. Pokrashchennia enerhetychnykh vlastyvostei stenda dlia vyprovovan kolektornykh tiahovykh dvyhuniv lokomotyviv [Improvement of energy properties for testing stand of locomotive commutator of traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 69-71.
8. Loza P.O. Pokrashchennia enerhetychnykh ta inshykh pokaznykiv pryimalno-zdavalnykh vyprovovan tiahovykh dvyhuniv elektrovoziv [Energy and other performances improvement in acceptance tests of electric locomotives traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 81-83.
9. Bocharov V.I., Vasilenko G.V., Kurochka A.L., Yanov V.P. *Magistralnyye elektrovozy. Tyagovyye elektricheskoye mashiny* [Mainline electric locomotives. Traction electric machines]. Moscow, Energoatom Publ., 1992. 464 p.
10. *Pravyly remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektrovozdiv. TsT-0204* [Rules for repair of electric machines of electric locomotives and electric trains. TsT-0204]. Kyiv, Vydavnychiy dim «SAM», 2012. 286 p.
11. Castaneda C.E., Loukianov A.G., Sanchez E.N. Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor with Controlled Flux. *IEEE Transactions. Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, issue 2, pp. 1194-1206. doi: 10.1109/tie.2011.2161246.
12. El Hayek J., Sobczyk T. J., Skarpetowski G. Experiences with a traction drive laboratory model. *Electromotion*, 2010, vol. 17, issue 1, pp. 30-36.
13. Liu Y., Eberle W. Developments in Switching Mode Supply Technologies. *IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies. Fall*, 2009, no. 61, pp. 9-14.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Украина), д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцом (Украина)

Поступила в редколлегию: 03.04.2014

Принята к печати: 23.05.2014