

УДК 621.313.001.4

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЖТ)

Кафедра Электроподвижной состав, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: [afanasof@ukr.net](mailto:afanasof@ukr.net)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ НА НАГРЕВ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МАГИСТРАЛЬНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

### Введение

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

### 1 Анализ параметров нагружения тяговых двигателей при испытании на нагрев

Режим нагружения тяговых электромашин при испытании на нагрев характеризуется такими параметрами как [1]:

- 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 [1] 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 (часовому) току.

Результаты исследований, проведенных в работах [2, 3], 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 жёсткой 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 её 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 номи-

© Афанасов А. М., 2013

нальному значению. При выполнении проверки коммутации коэффициент ослабления поля должен быть принят минимальным, что обусловлено требованиями к качеству данной проверки [1,4].

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 [1], так и правила ремонта тяговых электромашин [4] 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 [1].

Экономический эффект от внедрения такого метода испытания на нагрев обуславливается экономией электроэнергии, расходуемой на вентиляцию и отсутствием необходимости наличия вентиляционной системы на испытательной станции. Следует отметить, что испытание на нагрев без вентиляции еще и повышает энергетическую эффективность нагревания обмоток электромашин за счёт снижения энергии теплоотдачи [5].

Существенным недостатком испытания на нагрев без вентиляции является отсутствие проверки эффективности охлаждения частей электромашин, которая определяется мощностью теплоотдачи [6, 7]. При таком методе испытания малое влияние на характер теплообменных процессов оказывают тепловые сопротивления конвективной и кондуктивной теплоотдачи, а также аэродинамическое сопротивление электромашин. Всё это приводит к снижению качества испытаний на нагрев.

Ещё 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 определе-

ние 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, но ГОСТом 2582-81 предусмотрена проверка коммутации, которая требует возможности 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 ток нагрузки электромашин при испытании на нагрев должен быть принят, равным часовому значению. При этом и ГОСТ 2582-81 и правила ремонта тяговых электромашин [1, 4] допускают проведение испытания при эквивалентных токах, дающих превышение температур обмоток электромашин, соответствующее длительному режиму.

## 2 Обоснование критериев выбора рационального режима нагружения тяговых двигателей при испытании

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 [5], 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 [5].

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

где  $T_э$  – эквивалентная постоянная времени нагревания;

$\tau_1$  – превышение температуры обмотки в конце испытания;

$\tau_\infty$  – установившееся превышение температуры;

$t_1$  – время испытания на нагрев;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Время проведения испытаний на нагрев определяется формулой [8]

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

Значение превышения температуры  $\tau_1$  в соответствии с ГОСТ 2582-81 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 [7], поэтому в дальнейшем будем рассматривать превышение температуры именно этой обмотки. При этом необходимо отметить, что выбор рационального тока нагрузки для тяговых электромашин с другими лимитирующими обмотками будет аналогичным по принципу.

В формуле (1) параметрами, определяющими критерий энергетической эффективности  $k_{\text{эфн}}$ , являются значения  $\tau_\infty$  и  $T_3$ . Эквивалентная постоянная времени  $T_3$  для тяговых двигателей электровозов и тяговых агрегатов может приниматься постоянной и независимой от тока нагрузки. А установившееся превышение температуры  $\tau_\infty$  является функцией тока нагрузки, которую можно считать известной для каждого типа тягового двигателя [7]. Характер такой зависимости приведен на рис. 1.

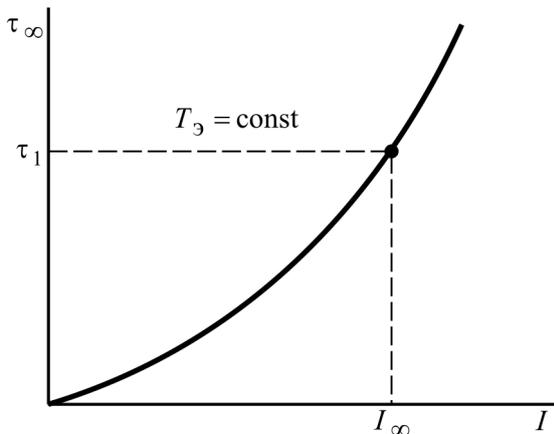


Рис. 1. Характер зависимости  $\tau_\infty(I)$

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  $I_\infty$  – 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  $\tau_\infty$  время испытания  $t_1$  уменьшается, а коэффициент энергетической эффективности  $k_{\text{эфн}}$  увеличивается.

При стремлении значений  $I$  и  $\tau_\infty$  к бесконечности время испытания  $t_1$  стремится к нулю, а коэффициент энергетической эффективности  $k_{\text{эфн}}$  – 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.

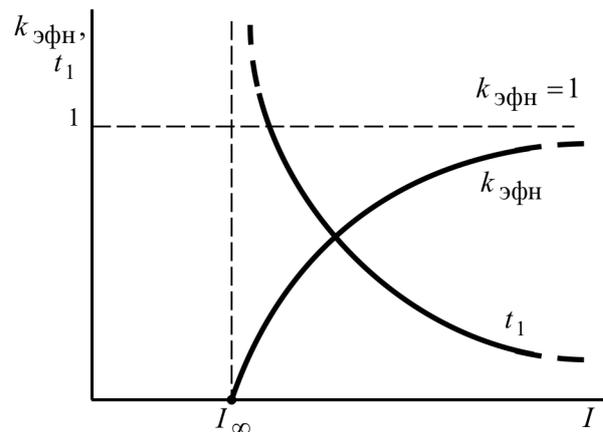


Рис. 2. Характеры зависимостей  $k_{\text{эфн}}(I)$  и  $t_1(I)$

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 [9]

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

где  $\eta$  – 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 [6]. Качественно характеристика  $\eta(I)$  приведена на рис. 3. На этом же рисунке качественно показан характер зависимости  $\sum \bar{p}_{и}(I)$ , который соответствует выражению (3).

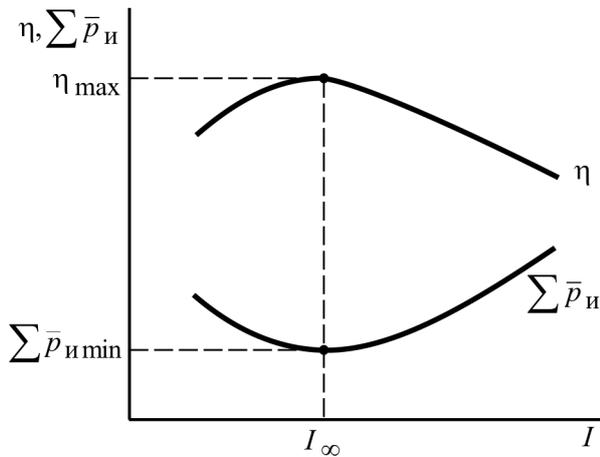


Рис. 3. Характеры зависимостей  $\eta(I)$  и  $\sum \bar{p}_{и}(I)$

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 ведёт к возрастанию  $\sum \bar{p}_{и}$ .

### 3 Определение рационального тока нагрузки тяговых двигателей при испытании на нагрев

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.

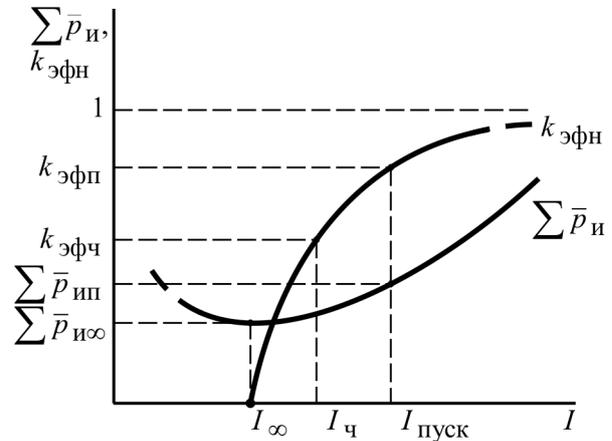


Рис. 4. Определение рационального тока нагрузки

Минимально допустимым значением приведенной мощности является  $\sum \bar{p}_{и}(I_{пуск})$ . 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

$$I \in [I_{пуск}; \infty).$$

Анализ зависимостей  $k_{эфн}(I)$ , полученных для реальных типов тяговых электродвигателей [7], 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.

$$I_{рац} = I_{пуск}.$$

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.

$$I_{\text{рац}} = I_{15}$$

### Выводы

Проведение испытаний тяговых электрических двигателей на нагрев при токах нагрузки,

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Афанасов, А. М. Качественный анализ электрических и магнитных потерь в якорях тяговых электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 36. – С. 13-18.
3. Афанасов, А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С 77-80.
4. Правила ремонту электрических машин электровозов і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К.: Видвничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
5. Афанасов, А.М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин при приёмо-сдаточных испытаниях [Текст] / А. М. Афанасов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8(59). – С. 6-9.
6. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 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. Взаимное нагружение тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Східноукраїнського державного університету імені В. Даля. Вип. 5(176). – Ч. 1. – Луганськ: СУДУ, 2012. – С.202-206.

Поступила в печать 11.03.2013.

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

равных пусковому току (для ЭПС магистрального транспорта) или пятнадцатиминутному (для ЭПС промышленного транспорта), позволит снизить расходы электроэнергии на испытания на 20 – 30% и сократить длительность испытаний в три – четыре раза при минимуме приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения.

### REFERENCES

1. GOST 2582-81. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye [Rotating electrical machines traction] / Gosudarstvenny standart SSSR – State Standard of the USSR. Moscow, Publisher standards, 1981. 50 p.
2. Afanasov A. M. Kachestvennyy analiz elektricheskikh i magnitnykh poter v yakoryakh tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo toka [Qualitative analysis of the electric and magnetic losses in traction anchors dc electrical machines]. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut» – Journal of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2010, № 36. pp. 13-18.
3. Afanasov A. M. Universalnye kharakteristiki magnitnykh poter v tyagovykh elektricheskikh mashinakh [Universal characteristics of magnetic losses in traction electric machines]. Visnik Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana – Journal of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2010, issue 31, pp. 77-80.
4. Pravila remontu elektricheskikh mashin elektrovoziv i elektropoizdiv. TsT-0063 [Rules repair electric cars and electric trains. TsT-0063]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 287 p.
5. Afanasov A. M. Energeticheskaya effektivnost nagrevaniya obmotok tyagovykh elektromashin pri priemo-sdatochnykh ispytaniyakh [The energy efficiency of the heating coils of electric traction in the acceptance tests]. Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East European Journal of advanced technologies, 2012, № 5/8(59), pp. 6-9.
6. Zakharchenko D. D., Rotanov N. A., Gorchakov E. V. Tyagovye elektricheskie mashiny i transformatory [Traction electric machines and transformers]. Moscow, Transport, 1979. 303 p.
7. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty [Rules traction calculations for train operation]. Moscow, Transport, 1985. 287 p.
8. Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]. Moscow, Transport, 1983. 328 p.
9. Afanasov A. M. Vzaimnoe nagruzhenie tyagovykh elektromashin s raskhodyashchimisya magnitnymi kharakteristikami [Mutual loading of electric traction with diverging magnetic characteristics]. Visnik Skhidnoukraïnskogo derzhavnogo universitetu imeni V. Dalya – Journal the Eastern University named after V. Dalya. Lugansk, 2012, issue 5(176), part 1. pp. 202-206

Статья рекомендована к печати д.т.н., профессором Г. К. Гетьманом

Рассмотрены вопросы выбора рационального режима взаимного нагружения тяговых электрических двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта при их испытании на нагрев.

Показано, что энергетические затраты на проведение испытаний тяговых двигателей на нагрев могут быть снижены как за счёт повышения энергетической эффективности системы взаимной нагрузки, так и путём оптимизации режима нагружения тяговых электромашин. Предложено проведение испытаний на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта при пусковом и пятнадцатиминутном токе нагрузки соответственно.

Показано, что проведение испытаний тяговых электрических двигателей на нагрев при токах нагрузки, равных пусковому или пятнадцатиминутному значениям, позволит снизить расходы электроэнергии на испытания на 20-30% и сократить длительность испытаний в три-четыре раза при минимуме приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения.

#### УДК 621.313.001.4

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ)

Кафедра Електрорухомий склад, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: [afanasof@ukr.net](mailto:afanasof@ukr.net)

### ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРОБУВАНЬ НА НАГРІВ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ МАГІСТРАЛЬНОГО І ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ.

Розглянуто питання вибору раціонального режиму взаємного навантаження тягових електричних двигунів електрорухомого складу магистрального і промислового транспорту при їх випробуванні на нагрів.

Показано, що енергетичні витрати на проведення випробувань тягових двигунів на нагрів можуть бути понижені як за рахунок підвищення енергетичної ефективності системи взаємного навантаження, так і шляхом оптимізації режиму навантажування тягових електромашин. Запропоноване проведення випробувань на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу магистрального і промислового транспорту при пусковому і п'ятнадцятихвилинному струмі навантаження відповідно.

Показано, що проведення випробувань тягових електричних двигунів на нагрів при струмах навантаження, рівних пусковому або п'ятнадцятихвилинному значенням, дозволить понизити витрати електроенергії на випробування на 20-30% і скоротити тривалість випробувань в три-чотири рази при мінімумі приведеної потужності джерел живлення системи взаємного навантажування

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

Статтю рекомендовано до друку д.т.н, професором *Г. К. Гетьманом*

#### UDC 621.313.001.4

A. M. AFANASOV (DNURT)

Department of Electric rolling-stock, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: [afanasof@ukr.net](mailto:afanasof@ukr.net).

### IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF THE HEATING TEST THE TRACTION MOTORS OF ELECTRIC ROLLING TRUNK AND INDUSTRIAL TRANSPORT

The problems of choice of a rational regime of mutual loading traction electric motors electric rolling trunk and industrial vehicles when testing for heat.

It is shown that the energy costs of the tests of traction motors for heating can be reduced both by increasing the energy efficiency of the system of mutual load and by optimizing the loading regime of electric traction. Proposed testing for heat traction motors of electric rolling trunk and industrial vehicles and fifteen minutes at the starting load current, respectively.

It is shown that the testing of electric traction motors for heating at load currents equal to the start-up or fifteen-minute values will reduce the cost of electricity to the test by 20-30% and reduce the duration of the test is three to four times with a minimum relative power of power supplies system for the mutual loading.

**Keywords:** structure of electric, traction motor, mutual loading test, the heating, energy efficiency, load current, rationality, thermal performance.

Prof. *G. K. Getman*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.

© Афанасов А. М., 2013