

А. М. АФАНАСОВ, А. Е. ДРУБЕЦКИЙ, А. С. МЯСНИКОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», 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)

## ПОКРЫТИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА В СИСТЕМЕ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

### Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и мотор-вагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин [1-3]. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции. Испытания на нагрев, проверка частоты вращения и реверсирования, а также проверка коммутации требуют обязательного нагружения тяговых электромашин.

Высокую энергетическую эффективность при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытуемыми электромашин [4]. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для покрытия потерь мощности в испытуемых электромашин.

Покрывание отдельных видов потерь мощности в системах взаимного нагружения может осуществляться как прямыми, так и косвенными методами, при использовании косвенных способов покрытие потерь обеспечивается за счёт небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин, которая может создаваться за счёт разности либо электродвижущих сил электромашин, либо разности их электромагнитных моментов [5].

### Цель

Целью данной работы является анализ режимов регулирования небалансного электромагнитного момента взаимно нагруженных тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока, испытуемых с использованием схемы взаимной нагрузки с одним источником электрической мощности.

### Методика

Одна из схем, позволяющая реализовать электрический способ покрытия потерь холостого хода, представлен на рис. 1. На данной схеме обмотки якорей и обмотки возбуждения испытуемых тяговых электромашин ( $M$  – двигатель,  $G$  – генератор) соединены последовательно и подключены к источнику напряжения «ИН». Валы испытуемых электромашин соединены муфтой (на рисунке не показана). Обмотка возбуждения генератора шунтирована регулятором ослабления поля РОП.

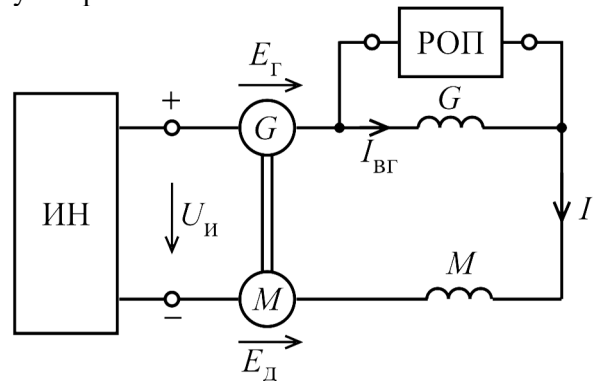


Рис. 1. Схема взаимного нагружения

Характеристики управляющих параметров, обеспечивающие режим взаимного нагружения электромашин по данному варианту, имеют вид [5]:

$$U_u > 0; \Phi_\partial > \Phi_z; \Delta\Phi > 0,$$

где  $U_u$  – напряжение источника питания;  
 $\Phi_\partial, \Phi_z$  – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;

$\Delta\Phi = \Phi_\partial - \Phi_z$  – разность магнитных потоков.

Протекание тока нагрузки  $I$  вызывает падение напряжения на суммарном активном сопротивлении цепи  $\sum \Delta U$ .

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данной схемы взаимной нагрузки имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_u - C \Delta \Phi \omega; \\ \sum \Delta M = C \Delta \Phi I. \end{cases}$$

Кривые, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей испытуемых электромашин при изменении тока нагрузки, качественно показаны на рис. 2.

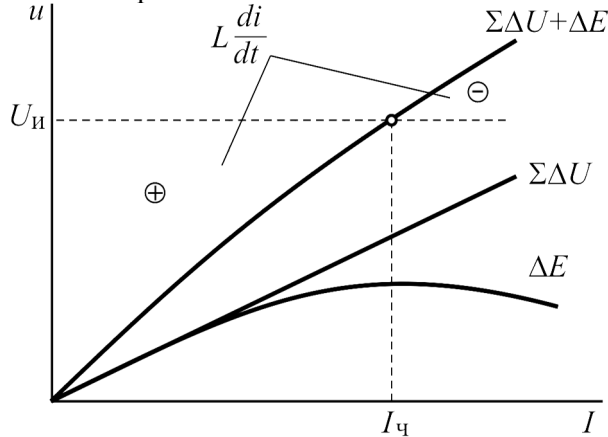


Рис. 2. Кривые, характеризующие баланс напряжений

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода [5] регулирование небалансной электромагнитной мощности  $\Delta P_{эм}$  сводится к регулированию небалансного электромагнитного момента  $\Delta M_{эм}$ , который определяет угловую скорость  $\omega_d$  и напряжения на испытуемых электромашинах. Небалансный электромагнитный момент и угловая скорость связаны между собой уравнением [5]

$$\Delta M_{эм} = \sum \Delta M + J_э \frac{d\omega}{dt},$$

где  $\sum \Delta M$ ,  $J_э$  – потери момента холостого хода в стенде и эквивалентный момент инерции, приведенные к валу испытуемого двигателя.

Структурная схема регулирования угловой скорости  $\omega_d$  представлена на рис. 3.

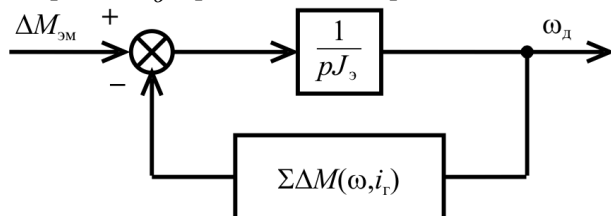


Рис. 3. Структурная схема регулирования угловой скорости

Момент сопротивления  $\Delta M$  для каждой из электромашин является функцией угловой скорости  $\omega$  и магнитного потока  $\Phi$  [4]. Магнитный поток  $\Phi$  в каждой из электромашин опре-

деляется током возбуждения, зависящим от тока нагрузки  $I$ .

$$\Delta M = f(\omega_d, i).$$

В стационарном режиме

$$\omega_d = f^*(\Delta M_{эм}),$$

где  $f^*$  – функция, обратная  $f$ .

Уравнение баланса моментов для установившегося режима вращения якорей испытуемых электромашин можно представить в виде [5]

$$\sum \Delta M = C \Delta \Phi I,$$

где  $\sum \Delta M$  – общие потери момента в испытуемых электромашинах;

$\Delta \Phi = \Phi_d - \Phi_г$  – разность магнитных потоков;

$C$  – конструктивная постоянная электромашин;

$I$  – ток нагрузки (якорей) электромашин.

$$\sum \Delta M = \Delta M_d + \Delta M_г,$$

где  $\Delta M_d$ ,  $\Delta M_г$  – потери момента двигателя и генератора соответственно.

В данной схеме возможна установка одинакового для испытуемых электромашин номинального значения токов якорей  $I = I_n$ . Установление значения тока возбуждения, равным номинальному, при проведении приемосдаточных испытаний является условием, обязательным для той электромашин, которая работает двигателем, и для которой, согласно требованиям к испытаниям, определяется значение частоты вращения якоря [1]. Тогда соотношение токов возбуждения испытуемых двигателя  $I_{вд}$  и генератора  $I_{вг}$  для данной схемы будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_{вд} = I_n; \\ I_{вг} < I_n. \end{cases}$$

Ток возбуждения двигателя устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения генератора – меньшим номинального. При этом варианте обмотка возбуждения электромашин, работающей генератором, недогружена по току на величину

$$\Delta I_{вг} = I_n - I_{вг}.$$

Графически характер соотношения токов возбуждения испытуемых электромашин показан на рис. 4.

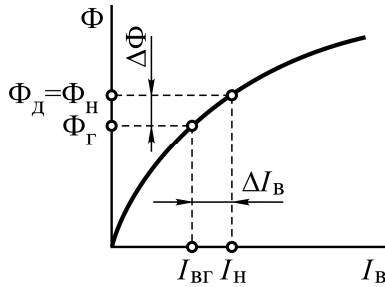


Рис. 4. Характер соотношения токов возбуждения испытуемых электромашин

Разность магнитных потоков  $\Delta\Phi$ , обеспечивающая покрытие потерь моментов электромашин, определяется разностью токов возбуждения  $\Delta I_{\text{в}}$  и местом положения точки, соответствующей номинальному режиму, на кривой намагничивания  $\Phi = f(I_{\text{в}})$ .

Для номинального режима значение  $\Delta\Phi$  может быть определено в виде

$$\Delta\Phi_{\text{н}} = \frac{\Delta M_{\text{д}} + \Delta M_{\text{с}}}{C I_{\text{н}}} \quad (1)$$

Строго говоря, магнитные потери мощности и момента в генераторе при испытаниях по данной схеме должны быть меньше, чем в двигателе в связи с меньшим значением магнитного потока. Однако предварительные расчеты показывают, что в тяговых электрических двигателях (с коэффициентом полезного действия более 0,9) это различие не будет превышать 10 %. При этом суммарные потери, связанные с вращением роторов электромашин (механические и магнитные) будут отличаться не более чем на 5%. В связи с изложенным выше формулу (1) можно записать в упрощенном виде

$$\Delta\Phi_{\text{н}} = \frac{2\Delta M_{\text{н}}}{C I_{\text{н}}} \quad (2)$$

где  $\Delta M_{\text{н}}$  – механические и магнитные потери момента одной электромашин в номинальном режиме.

Поделив левую и правую часть уравнения (2) на номинальное значение магнитного потока  $\Phi_{\text{н}}$ , после преобразований получим

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}} = \frac{2\Delta M_{\text{н}}}{M_{\text{эмн}}} \quad (3)$$

где  $M_{\text{эмн}}$  – номинальное значение электромагнитного момента электромашин.

Это же выражение может быть записано в виде соотношения мощностей

$$\frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}} = \frac{2\Delta P_{\text{ххн}}}{P_{\text{эмн}}} \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\text{ххн}}$  – потери холостого хода в одной электромашине при номинальном режиме;

$P_{\text{эмн}}$  – номинальная электромагнитная мощность одной электромашин.

Введем следующие обозначения:

$K_{\Delta\Phi} = \frac{\Delta\Phi_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}}}$  – относительная разность магнитных потоков;

$\Delta p_{\text{хх}} = \frac{\Delta P_{\text{ххн}}}{P_{\text{эмн}}}$  – относительные потери холостого хода;

$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{\text{в}}}{I_{\text{н}}}$  – относительная разность токов возбуждения.

Согласно (4) связь между данными параметрами имеет вид

$$K_{\Delta\Phi} = 2\Delta p_{\text{хх}} \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета зависимости  $K_{\Delta\Phi} = f(K_{\Delta I})$ , полученные с использованием универсальной магнитной характеристики [6] для трёх значений коэффициента магнитного насыщения в номинальном режиме  $k_{\text{н}}$  (1,67; 1,91; 2,15).

Таблица 1

Зависимости  $K_{\Delta\Phi} = f(K_{\Delta I})$

|                     |                  |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $k_{\text{н}}=1,67$ | $K_{\Delta I}$   | 0,111 | 0,222 | 0,333 | 0,444 | 0,556 | –     | –     |
|                     | $K_{\Delta\Phi}$ | 0,039 | 0,082 | 0,132 | 0,208 | 0,308 | –     | –     |
| $k_{\text{н}}=1,91$ | $K_{\Delta I}$   | 0,091 | 0,182 | 0,273 | 0,364 | 0,455 | 0,545 | –     |
|                     | $K_{\Delta\Phi}$ | 0,031 | 0,064 | 0,100 | 0,140 | 0,187 | 0,258 | –     |
| $k_{\text{н}}=2,15$ | $K_{\Delta I}$   | 0,077 | 0,154 | 0,231 | 0,308 | 0,385 | 0,462 | 0,538 |
|                     | $K_{\Delta\Phi}$ | 0,022 | 0,046 | 0,075 | 0,107 | 0,142 | 0,180 | 0,225 |

В табл. 2 приведены результаты расчёта зависимости относительной разности токов возбуждения  $K_{\Delta I}$  от приведенных потерь  $\Delta p_{xx}$

одной электромашины, полученные по формуле (5) и данным таблицы 1.

Таблица 2

Зависимости  $K_{\Delta I} = f(\Delta p_{xx})$

|            |                 |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $k_n=1,67$ | $\Delta p_{xx}$ | <u>0,019</u> | <u>0,041</u><br>0,011 | <u>0,066</u><br>0,036 | <u>0,104</u><br>0,074 | <u>0,154</u><br>0,124 | –                     | –                     |
|            | $K_{\Delta I}$  | 0,111        | 0,222                 | 0,333                 | 0,444                 | 0,556                 | –                     | –                     |
| $k_n=1,91$ | $\Delta p_{xx}$ | <u>0,016</u> | <u>0,032</u><br>0,002 | <u>0,050</u><br>0,020 | <u>0,070</u><br>0,040 | <u>0,094</u><br>0,064 | <u>0,129</u><br>0,099 | –                     |
|            | $K_{\Delta I}$  | 0,091        | 0,182                 | 0,273                 | 0,364                 | 0,455                 | 0,545                 | –                     |
| $k_n=2,15$ | $\Delta p_{xx}$ | <u>0,011</u> | <u>0,023</u>          | <u>0,038</u><br>0,008 | <u>0,054</u><br>0,024 | <u>0,071</u><br>0,041 | <u>0,090</u><br>0,060 | <u>0,113</u><br>0,082 |
|            | $K_{\Delta I}$  | 0,077        | 0,154                 | 0,231                 | 0,308                 | 0,385                 | 0,462                 | 0,538                 |

Значения  $\Delta p_{xx}$ , приведенные в числителе, относятся к случаю совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин, а приведенные в знаменателе – к случаю максимального их расхождения (6%).

### Выводы

Значение коэффициента  $K_{\Delta \Phi}$ , необходимое для создания условий компенсации механических и магнитных потерь, будет определяться значением  $K_{\Delta I}$  и коэффициентом магнитного насыщения испытуемых электромашин.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
- Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К. : Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
- Правила ремонту електричних машин тепловозів. ЦТ-0064 [Текст]. – К. : Видавничий дім «САМ», 2003. – 122 с.
- Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. – М. : Транспорт, 1979. – 303 с.
- Афанасов, А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока / А. М. Афанасов // Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
- Находкин, М. Д. Универсальная магнитная характеристика тяговых электродвигателей постоянного тока [Текст] / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44-48.

С увеличением коэффициента магнитного насыщения  $k_n$  значение  $K_{\Delta I}$ , соответствующее заданному  $\Delta p_{xx}$ , растет. Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин требует существенного запаса диапазона регулирования разницы их токов возбуждения. Для решения данной проблемы в системе взаимного нагружения должна быть предусмотрена возможность удобного взаимного переключения режимов нагружения испытуемых электромашин: «двигатель» – «генератор».

### REFERENCES

- GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye* [Rotating electrical machines traction] / Gosudarstvennyy standart SSSR – State Standard of the USSR. Moscow, Publisher standards, 1981. 50 p.
- Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektrovozdiv. TsT-0063* [Rules repair electric cars and electric trains. TsT-0063]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 286 p.
- Pravila remontu elektrichnikh mashin i teplovoziv. TsT-0064* [Rules repair of electric machines for diesel locomotive. TsT-0064]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 122 p.
- Zakharchenko D. D., Rotanov N. A., Horchakov E. V. *Tyagovye elektricheskiye mashiny i transformatory* [Traction electric machines and transformers]. Moscow, Transport Publ., 1979. 303 p.
- Afanasov A. M. *Printsipy sintenza skhem vzaimnoy nagruzki tyagovykh elektromashin postoyannogo toka* [Principles of synthesis schemes of mutual load of electric traction a direct current]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical Engineering and Automation], 2010, issue 85, pp. 183-189.
- Nakhodkin M. D., Hvostov V. C. *Universalnaya magnitnaya kharakteristika tyagovykh elektrodvigatelye*

Поступила в печать 01.12.2012.

*postoyannogo toka* [Universal magnetic characteristics of direct current traction electric motors]. *Vestnik elektropromyshlennosti* [Bulletin of the electrical industry], 1958, issue 1, pp. 44-48.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Приведены результаты анализа электрического способа покрытия потерь холостого хода в системах взаимного нагружения тяговых двигателей с одним источником мощности. Рассмотрен вариант косвенного метода покрытия потерь холостого хода путем обеспечения разности магнитных потоков испытуемых электромашин. Получены зависимости относительной разности токов возбуждения взаимно нагруженных электромашин от приведенных потерь холостого хода одной электромашин для различных значений коэффициента магнитного насыщения.

**Ключевые слова:** тяговый электрический двигатель, испытание, взаимная нагрузка, потери холостого хода, электромагнитный момент.

**УДК 629.423.31- 48.24**

**А. М. АФАНАСОВ, А. Ю. ДРУБЕЦКИЙ, А. С. М'ЯСНИКОВ (ДНУЗТ)**

Кафедра «Електрорухоми́й склад залізниць», 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)

## ПОКРИТТЯ ВТРАТ ХОЛОСТОГО ХОДУ В СИСТЕМІ ВЗАЄМНОЇ НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ З ОДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Наведено результати аналізу електричного способу покриття втрат холостого ходу в системах взаємного навантаження тягових двигунів з одним джерелом потужності. Розглянуто варіант непрямого методу покриття втрат неробочого ходу шляхом забезпечення різниці магнітних потоків випробовуваних електромашин. Одержані залежності відносної різниці струмів збудження взаємно навантажених електромашин від наведених втрат холостого ходу однієї електромашини для різних значень коефіцієнта магнітного насичення.

**Ключові слова:** тяговий електричний двигун, випробування, взаємне навантаження, втрати холостого ходу, електромагнітний момент.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

**UDC 629.423.31- 48.24**

**A. M. AFANASOV, A. E. DRUBETSKIY, A. S. MYASNIKOV (DNURT)**

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: [afanasof@ukr.net](mailto:afanasof@ukr.net)

## COVERING LOSSES IN THE SYSTEM OF MUTUAL LOADING OF TRACTION MOTORS WITH A SINGLE SOURCE OF ELECTRICAL POWER.

The results of the analysis of the electrical coating process load losses in the systems of mutual loading of traction motors with a single power source. A variant of the indirect method of covering load losses by providing a difference in the subjects of electric magnetic fluxes. The dependence of the relative difference between the excitation currents mutually loaded from those of electric load losses one electric machine for different values of the coefficient of magnetic saturation.

**Keywords:** traction electric motors, testing, mutual load, no-load losses, electric magnetic moment.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*