

UDC 629.423.31-048.24:537.8

A. M. 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

REGULATION OF UNBALANCED ELECTROMAGNETIC MOMENT IN MUTUAL LOADING SYSTEMS OF ELECTRIC MACHINES OF TRACTION ROLLING STOCK AND MULTIPLE UNIT OF MAINLINE AND INDUSTRIAL TRANSPORT

Purpose. The research data are aimed to identify the regulatory principles of unbalanced electromagnetic moment of mutually loaded electric machines of traction rolling stock and multiple unit of main and industrial transport. The purpose of this study is energy efficiency increase of the testing of traction electric machines of direct and pulse current using the improvement methods of their mutual loading, including the principles of automatic regulation of mutual loading system. **Methodology.** The general theoretical provisions and principles of system approach to the theoretical electric engineering, the theory of electric machines and theoretical mechanics are the methodological basis of this research. The known methods of analysis of electromagnetic and electromechanical processes in electrical machines of direct and pulse current are used in the study. Methods analysis of loading modes regulation of traction electric machines was conducted using the generalized scheme of mutual loading. It is universal for all known methods to cover the losses of idling using the electric power. **Findings.** The general management principles of mutual loading modes of the traction electric machines of direct and pulse current by regulating their unbalanced electric magnetic moment were developed. Regulatory options of unbalanced electromagnetic moment are examined by changing the difference of the magnetic fluxes of mutually loaded electric machines, the current difference of electric machines anchors, the difference of the angular velocities of electric machines shafts. **Originality.** It was obtained the scientific basis development to improve the energy efficiency test methods of traction electric machines of direct and pulse current. The management principles of mutual loading modes of traction electric machines were formulated. For the first time it is introduced the concept and developed the principles of regulation of unbalanced electromagnetic moment in the mutual loading systems of electric machines of direct and pulse current. Analytical expressions for the unbalanced moment of mutually loaded electromagnetic electric machines were obtained. The requirements for automatic regulation systems of the mutual loading stands of the traction electric machines of direct and pulse current are formulated. **Practical value.** Using the results of the theoretical research will significantly simplify the development algorithms of the test stands management of the traction electric machines of rolling stock for mainline and industrial transport. Introduction of the proposed principles of mutual loading for traction electric machines will significantly reduce the costs for creating new stations and modernization of the existing ones for testing of traction electric machines. Automating the process of refit and acceptance tests of traction electric machines will significantly improve the test quality and reliability of the traction rolling stock and multiple unit with electric traction drive.

Keywords: traction electric machines; tests; mutual loading; electromagnetic moment; regulation

Introduction

Requirements of the relevant standards and repair regulations of traction rolling stock and multiple units of the main and industrial vehicles provide acceptance tests for each newly produced traction electric machine or after repair [3, 10]. These tests are an important and integral part of the technological processes of manufacturing or repair of electric cars, material costs for which are included in the cost of the final product. Heating tests, check of rotation and reverse frequency, as

well as commutation test require inevitable loading of the traction electric machines.

High energy efficiency at a relatively low total power of the supply sources is provided by the systems of mutual loading, in which there is energy exchange between the electric machines under study [11–13]. External supply sources in such loading systems are only required to cover the power losses in the electric machines under study [6–8].

Cover of certain types of power losses in the mutual loading systems can be carried out by both

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

direct and indirect methods. The use of indirect methods the loss covering is realized by using unbalanced electromagnetic power of the studied electric machines. This power can be created due to the difference of both electromotive forces of electric machines or the difference of their electromagnetic moments [4].

Purpose

The paper is aimed to determine the regulatory principles of unbalanced electromagnetic torque of mutually loaded electric machines of traction rolling stock and multiple units of the mainline and industrial transport.

Methodology

Unbalanced electromagnetic power of mutually loaded electric machines of direct and pulse current can be represented as the difference [1, 2]

$$\Delta P_{\text{эм}} = P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}},$$

where $P_{\text{эмг}}$, $P_{\text{эмд}}$ – are electromagnetic powers of the tested generator and engine accordingly [5, 9].

$$P_{\text{эмг}} = c\Phi_g \omega_g I_g, \quad P_{\text{эмд}} = c\Phi_d \omega_d I_d,$$

where c – is a constructive constant of the tested electric machines of the single type; Φ_g , Φ_d – are the magnetic flows of the generator and engine accordingly; ω_g , ω_d – are the angular rotation velocities of the generator and motor armature respectively; I_g , I_d – are the armature currents of the generator and motor respectively.

In the mutual loading systems with electric method to cover the idling losses the regulation of angular speed of the tested electric machines is carried out by changing $\Delta P_{\text{эм}}$.

Generalized universal scheme of mutual loading system of electric cars, which makes it possible to realize all the possible variants of electric method to cover the idling losses, is shown in the Fig. 1.

In this scheme: M – are the windings of electric machine tested in the mode of motor; G – are the windings of electric machine tested in the mode of generator; И1 – is a consistent source of electric power; И2 – is a parallel source of electric power; P – is a gear (converter of angular velocity).

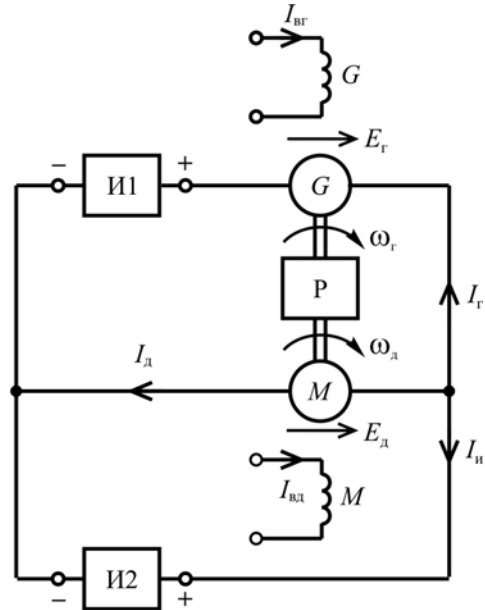


Fig. 1. Generalized universal scheme of mutual loading system

At the electric method to cover the idling losses the regulation of unbalanced electromagnetic power $\Delta P_{\text{эм}}$ is reduced to the regulation of the unbalanced electromagnetic torque $\Delta M_{\text{эм}}$ and, as a result of the angular velocity ω_d . These parameters are interconnected by the equation [1]

$$\Delta M_{\text{эм}} = \sum \Delta M + J_3 \frac{d\omega_d}{dt},$$

where $\sum \Delta M$, J_3 – are the idling torque losses in the stand and the equivalent torque of inertia, respectively, reduced to the shaft of the tested motor.

Block scheme of the angular velocity regulation ω_d is shown in the Fig. 2

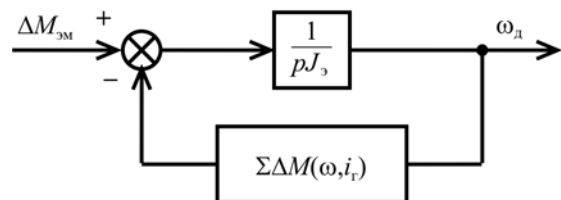


Fig. 2. The structural scheme of the angular rate regulation

Unbalanced electromagnetic torque of the tested generator and motor, reduced to the motor shaft can be expressed as

$$\Delta M_{\text{эм}} = M_{\text{эмд}} - M'_{\text{эмг}},$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

where $M_{\text{эмд}}$, $M'_{\text{эмг}}$ – are the electromagnetic torque of the motor and electromagnetic torque of the generator, respectively.

The reduced electromagnetic torque of the generator can be represented as

$$M'_{\text{эмг}} = M_{\text{эмг}} k_{\omega},$$

where $M_{\text{эмг}}$ – is electromagnetic torque of the tested engine; k_{ω} – is the coefficient of the angular velocity transfer of the gear P.

$$M_{\text{эмг}} = c\Phi_{\text{д}}I_{\text{д}}; M_{\text{эмд}} = c\Phi_{\text{д}}I_{\text{д}}.$$

After expressing the electromagnetic torques of the motor and the generator through the magnetic fluxes and currents, after transformations we obtain

$$\Delta M_{\text{эм}} = c(\Phi_{\text{д}}I_{\text{д}} - k_{\omega}\Phi_{\text{г}}I_{\text{г}}). \quad (1)$$

Let us consider the possible ways of regulating the values $\Delta M_{\text{эм}}$ by changing the parameters of regulators and converters of the mutual loading system.

The difference between magnetic fluxes $\Delta\Phi$, the armature current difference ΔI and the transfer coefficient of the angular velocity k_{ω} [1, 2] will be considered as the factors determining the value $\Delta M_{\text{эм}}$.

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}};$$

$$\Delta I = I_{\text{д}} - I_{\text{г}};$$

$$k_{\omega} = \frac{\omega_{\text{г}}}{\omega_{\text{д}}}.$$

The equation of the torques balance in the static mode for all the schemes of mutual loading with the electric method to compensate the idling losses will have the form [1]

$$\Delta M_{\text{эм}} = \sum \Delta M.$$

Findings

Let us consider the regulation variant $\Delta M_{\text{эм}}$ by changing the difference of magnetic fluxes, wherein:

$$\begin{cases} \Delta I = 0; \\ k_{\omega} = 1; \\ \Delta\Phi = \text{var}. \end{cases}$$

Then, the expression (1) can be transformed into the form

$$\Delta M_{\text{эм}} = c\Delta\Phi \cdot I.$$

At the consistency of the armature current of tested electric machines ($I = \text{const}$) the dependence $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta\Phi)$ is directly proportional. The nature of the dependence $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta\Phi)$ for different values of the constant armature current I is graphically shown in the Fig. 3.

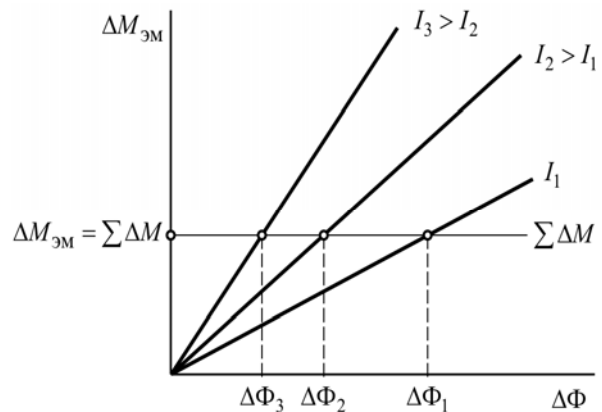


Fig. 3. The nature of the dependence of $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta\Phi)$

The Fig. 3 shows that at the higher load current I of the tested electric machines to compensate the given amount of the losses of torques $\sum \Delta M$ it is required a lesser value of the difference of magnetic fluxes $\Delta\Phi$.

$$\Delta\Phi_3 < \Delta\Phi_2 < \Delta\Phi_1.$$

Let us consider the variant of regulation $\Delta M_{\text{эм}}$ by changing the armature currents difference, wherein:

$$\begin{cases} k_{\omega} = 1; \\ \Delta\Phi \neq 0; \\ \Delta I = \text{var}. \end{cases}$$

In this variant of the regulation the condition $\Delta\Phi \neq 0$ is taken from considerations that the magnetic characteristics of a pair of the tested electric machines may not be the same [5, 9]. That is, the case of the magnetic characteristics divergence of the tested engine and generator is considered.

In this case the expression (1) can be written as

$$\Delta M_{\text{эм}} = c(\Phi_{\text{д}}I_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}I_{\text{г}}).$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

After transformations the same expression can be written in two ways:

$$\Delta M_{\text{эм}} = c(\Phi_{\text{д}} \cdot \Delta I + \Delta \Phi \cdot I_{\text{г}});$$

$$\Delta M_{\text{эм}} = c(\Delta \Phi \cdot I_{\text{д}} + \Phi_{\text{г}} \cdot \Delta I).$$

For the case of correspondence of the magnetic characteristics ($\Phi_{\text{д}} = \Phi_{\text{г}}$)

$$\Delta M_{\text{эм}} = c\Phi \Delta I.$$

Qualitatively the characteristics $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ for the condition $\Phi = \text{const}$ and $\Delta \Phi = 0$ are shown in the Fig. 4.

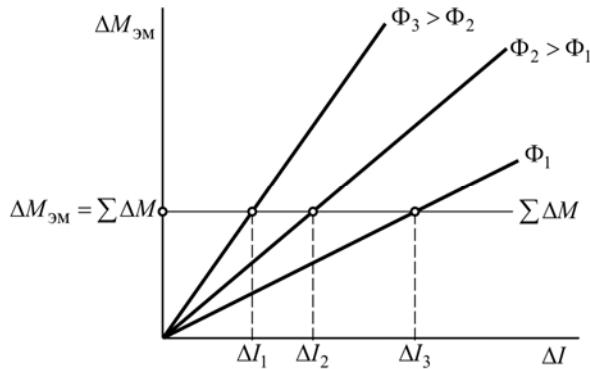


Fig. 4. The nature of the dependence of $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ for cases when $\Delta \Phi = 0$

At $\Delta \Phi = 0$ the dependence $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ is directly proportional. At $\Delta \Phi \neq 0$ the dependence $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ is linear. The Fig. 5 shows the nature of dependence $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ for three conditions: $\Delta \Phi = 0$; $\Delta \Phi > 0$; $\Delta \Phi < 0$.

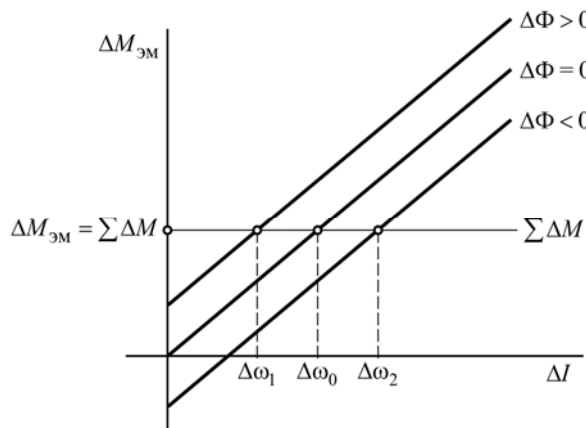


Fig. 5. The nature of the dependence of $\Delta M_{\text{эм}}(\Delta I)$ for cases when $\Delta \Phi \neq 0$

As one can see from the graphs in the Fig. 5, at the negative difference of magnetic fluxes of the tested electric machines ($\Delta \Phi < 0$) to create the given value $\Delta M_{\text{эм}}$ it is required the larger current difference ΔI than at the coincidence of magnetic characteristics ($\Delta \Phi = 0$). At the positive difference $\Delta \Phi > 0$ the required value ΔI is lesser than at $\Delta \Phi = 0$.

Let us consider the variant of regulating $\Delta M_{\text{эм}}$ by changing the coefficient of angular speed transfer, wherein:

$$\begin{cases} k_{\omega} = \text{var}; \\ \Delta \Phi \neq 0; \\ \Delta I = 0. \end{cases}$$

The condition $\Delta \Phi \neq 0$ is accepted in this variant of regulation from the same considerations as in the previous one.

The equation (1) for the given condition will have the form

$$\Delta M_{\text{эм}} = cI(\Phi_{\text{д}} - k_{\omega} \Phi_{\text{г}}).$$

After transformations we obtain the same expression in the form

$$\Delta M_{\text{эм}} = cI[\Phi_{\text{д}}(1 - k_{\omega}) + k_{\omega} \cdot \Delta \Phi].$$

At the coincidence of the magnetic characteristics of the tested electric machines

$$\Delta M_{\text{эм}} = (1 - k_{\omega})M_{\text{эмд}}.$$

Qualitatively the characteristics $\Delta M_{\text{эм}}(k_{\omega})$ for the condition $M_{\text{эмд}} = \text{const}$ and $\Delta \Phi = 0$ are shown in the Fig. 6.

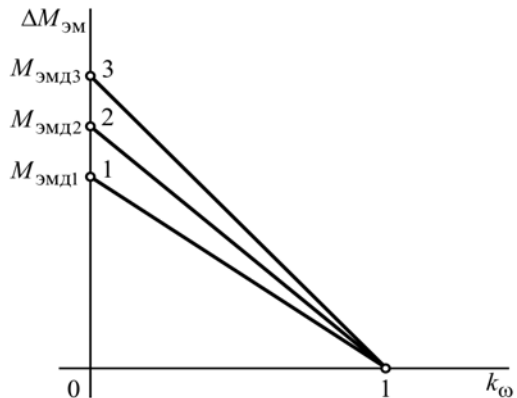


Fig. 6. The nature of the dependence of $\Delta M_{\text{эм}}(k_{\omega})$ for cases when $\Delta \Phi = 0$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

In these variants of the mutual loading systems the transfer coefficient of the angular velocity k_{ω} is always lesser than unity [2].

In the Fig. 7 it is qualitatively presented the dependence nature $\Delta M_{\text{эм}}(k_{\omega})$ for the case of divergence of the magnetic characteristics of the tested electric machines ($\Delta\Phi \neq 0$).

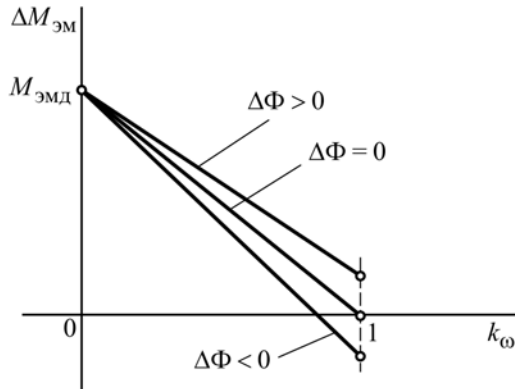


Fig. 7. The nature of the dependence of $\Delta M_{\text{эм}}(k_{\omega})$ for cases when $\Delta\Phi \neq 0$

As one can see from the graphs in the Fig. 7, at the negative difference of magnetic fluxes of the tested electric machines ($\Delta\Phi < 0$) to create a given value of unbalanced electromagnetic torque $\Delta M_{\text{эд}}$ it is required the coefficient of the angular velocity transfer k_{ω} smaller than at the coincidence of magnetic characteristics ($\Delta\Phi = 0$). At the positive difference $\Delta\Phi > 0$ the required value k_{ω} is greater than at $\Delta\Phi = 0$.

Originality and practical value

For the first time the concept was introduced and the principles of regulation of unbalanced electromagnetic torque in the systems of mutual loading for electric machines of direct and pulse current were considered. Analytical expressions for the unbalanced electromagnetic torque for mutually loaded electric machines, the use of which will facilitate the development of control algorithms for testing stands of the traction electric cars of rolling stock of mainline and industrial transport were obtained.

Conclusions

Unbalanced electromagnetic torque of mutually loaded traction electric machines provides an unbalanced electromagnetic power needed for the

implementation of electric method to cover the idling losses in the electric machines under study.

Regulation of unbalanced electromagnetic torque of mutually loaded traction electric machines can be realized by changing the difference of armature current, the difference of magnetic fluxes and the difference of the rotation angular velocities of electric machines armatures.

At the mutual loading of electric traction machines with divergent magnetic characteristics a broader range of regulating the magnetic fluxes of the machines under study is required.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Афанасов, А. М. Регулирование небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 87. – С. 84–87.
2. Афанасов, А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока : монография / А. М. Афанасов. – Днепропетровск : Маковецкий, 2012. – 248 с.
3. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
4. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
5. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины : учеб. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – Москва : Транспорт, 1991. – 343 с.
6. Лоза, П. О. Визначення еквівалентного струму навантаження при випробуванні тягових електродвигунів на нагрівання без вентиляції / П. О. Лоза, Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 26–29.
7. Лоза, П. О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 22. – С. 69–71.
8. Лоза, П. О. Покращення енергетичних та інших показників приймально-здавальних випробувань тягових двигунів електровозів / П. О. Лоза // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 81–83.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

9. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка, В. П. Янов. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
10. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів : ЦТ-0204. – Київ : Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.
11. 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. 59. – Iss. 2. – P. 1194–1206.
12. 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.
13. 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.

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

РЕГУЛЮВАННЯ НЕБАЛАНСНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ В СИСТЕМАХ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТЯГОВОГО ТА МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ МАГІСТРАЛЬНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Дані дослідження направлені на визначення принципів регулювання небалансного електромагнітного моменту взаємно навантажених електричних машин тягового і моторвагонного рухомого складу магістрального і промислового транспорту. Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму шляхом удосконалення методів їх взаємного навантаження, в тому числі – принципів автоматичного регулювання системами взаємного навантаження. **Методика.** Методологічною основою даного дослідження є загальні теоретичні положення та принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теорії електричних машин і теоретичної механіки. У дослідженні використовуються відомі методи аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів в електричних машинах постійного й пульсуючого струму. Аналіз методів регулювання режимами навантажень тягових електромашин проведено з використанням узагальненої схеми взаємного навантаження, універсальної для всіх відомих способів покриття втрат холостого ходу джерелом електричної потужності. **Результати.** Розроблено загальні принципи управління режимами взаємного навантаження тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму шляхом регулювання їх небалансного електромагнітного моменту. Розглянуто варіанти регулювання небалансного електромагнітного моменту шляхом зміни: різниці магнітних потоків взаємно навантажених електромашин, різниці струмів якорів електромашин, різниці кутових швидкостей валів електромашин. **Наукова новизна.** Отримали розвиток наукові основи удосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного й пульсуючого струму. Сформульовані принципи управління режимами взаємного навантаження тягових електромашин. Вперше введено поняття та розглянуто принципи регулювання небалансного електромагнітного моменту в системах взаємного навантаження електричних машин постійного й пульсуючого струму. Отримані аналітичні вирази для небалансного електромагнітного моменту взаємно навантажених електричних машин. Сформульовані вимоги до систем автоматичного регулювання стендами взаємного навантаження тягових електромашин постійного й пульсуючого струму. **Практична значимість.** Використання результатів даних теоретичних досліджень суттєво спростить розробку алгоритмів управління стендами для випробування тягових електричних машин рухомого складу магістрального і промислового транспорту. Впровадження запропонованих принципів взаємного навантаження тягових електромашин дозволить суттєво понизити витрати на створення нових і модернізацію існуючих станцій для випробування тягових електромашин. Автоматизація процесу післяремонтних приймально-здавальних випробувань тягових електромашин дозволить істотно підвищити якість випробувань і надійність тягового та моторвагонного рухомого складу з електричним тяговим приводом.

Ключові слова: тягові електричні машини; випробування; взаємне навантаження; електромагнітний момент; регулювання

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

РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕБАЛАНСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В СИСТЕМАХ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО И МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МАГИСТРАЛЬНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Данные исследования направлены на определение принципов регулирования небалансного электромагнитного момента взаимно нагруженных электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта. Целью исследования является повышение энергетической эффективности испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока путем усовершенствования методов их взаимного нагружения, в том числе – принципов автоматического регулирования системами взаимного нагружения. **Методика.** Методологической основой данного исследования являются общие теоретические положения и принципы системного подхода теоретической электротехники, теории электрических машин и теоретической механики. В исследовании используются известные методы анализа электромагнитных и электромеханических процессов в электрических машинах постоянного и пульсирующего тока. Анализ методов регулирования режимами нагружения тяговых электромашин проведен с использованием обобщенной схемы взаимной нагрузки, универсальной для всех известных способов покрытия потерь холостого хода источником электрической мощности. **Результаты.** Разработаны общие принципы управления режимами взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока путем регулирования их небалансного электромагнитного момента. Рассмотрены варианты регулирования небалансного электромагнитного момента путем изменения: разницы магнитных потоков взаимно нагруженных электромашин, разницы токов якорей электромашин, разницы угловых скоростей валов электромашин. **Научная новизна.** Получили развитие научные основы усовершенствования энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока. Сформулированы принципы управления режимами взаимного нагружения тяговых электромашин. Впервые введено понятие и рассмотрены принципы регулирования небалансного электромагнитного момента в системах взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока. Получены аналитические выражения для небалансного электромагнитного момента взаимно нагруженных электрических машин. Сформулированы требования к системам автоматического регулирования стендами взаимного нагружения тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока. **Практическая значимость.** Использование результатов данных теоретических исследований существенно упростит разработку алгоритмов управления стендами для испытания тяговых электрических машин подвижного состава магистрального и промышленного транспорта. Внедрение предложенных принципов взаимного нагружения тяговых электромашин позволит существенно снизить затраты на создание новых и модернизацию существующих станций для испытания тяговых электромашин. Автоматизация процесса послеремонтных приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин позволит существенно повысить качество испытаний и надежность тягового и моторвагонного подвижного состава с электрическим тяговым приводом.

Ключевые слова: тяговые электрические машины; испытание; взаимное нагружение; электромагнитный момент; регулирование

REFERENCES

1. Afanasov A.M. Regulirovaniye nebalansnoy elektromagnitnoy moshchnosti v sistemakh vzaimnogo nagruzeniya tyagovykh elektromashin [Regulation of unbalanced electromagnetic power in the mutual loading systems of electric traction machines]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining Electrical Engineering and Automation*, 2011, no. 87, pp. 84-87.
2. Afanasov, A. M. *Sistemy vzaimnogo nagruzeniya tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo i pulsiruyushchego toka* [Systems of mutual loading of traction electric machines of direct and pulse current]. Dnipropetrovsk, Izd-vo Makovetskiy Publ., 2012. 248 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya tyagovyye. Obshchiye tekhnicheskoye usloviya* [State Standard 2582-81. Rotating traction electric machines. General specifications]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1981. 34 p.
4. Zherve G.K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electric 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., Dubinets L.V., Ustyomenko D.V. Vyznachennia ekvivalentnoho strumu navantazhennia pry vyprovovuvanni tiahovykh elektrodvyhuniv na nahrivannia bez ventyliatsii [Determination of equivalent load current when testing the traction electric motors 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 [Improving the energy properties of testing stand for collector locomotive 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 [Improving the energy and other performance of acceptance testing of electric locomotive 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, Energoatomizdat Publ., 1992. 464 p.
10. *Pravyly remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropoizdiv* [Repair rules of electric machines for electric locomotives and electric trains]. 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.
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.

Prof. H. K. Hetman, D. Sc. (Tech.); Prof. F. P. Shkrabets, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published

Received: Sept. 12, 2014

Accepted: Nov. 3, 2014