

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (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

РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕБАЛАНСНОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ВЗАИМНО НАГРУЖЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

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 [4, 9]. 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 испытываемыми электромашин [5, 7, 8, 10]. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для покрытия потерь мощности в испытываемых электромашин.

Покрытие 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 испытываемых электромашин, которая может создаваться либо за счёт разности их электромагнитных моментов, либо за счёт разности электродвижущих сил электромашин [1, 2].

Целью данной работы является определение принципов регулирования небалансной электродвижущей силы взаимно нагруженных электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Методика

Небалансная электромагнитная мощность взаимно нагруженных электрических машин

постоянного и пульсирующего тока может быть представлена в виде разности [2]

$$\Delta P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМГ}} - P_{\text{ЭМД}},$$

где $P_{\text{ЭМГ}}$, $P_{\text{ЭМД}}$ – электромагнитные мощности испытываемых генератора и двигателя соответственно [3, 6].

$$P_{\text{ЭМГ}} = c\Phi_{\text{Г}}\omega_{\text{Г}}I_{\text{Г}}, \quad P_{\text{ЭМД}} = c\Phi_{\text{Д}}\omega_{\text{Д}}I_{\text{Д}},$$

где c – конструктивная постоянная однотипных испытываемых электромашин;

$\Phi_{\text{Г}}$, $\Phi_{\text{Д}}$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

$\omega_{\text{Г}}$, $\omega_{\text{Д}}$ – угловые скорости вращения якорей генератора и двигателя соответственно;

$I_{\text{Г}}$, $I_{\text{Д}}$ – токи якорей генератора и двигателя соответственно.

Путем изменения $\Delta P_{\text{ЭМ}}$ в системах взаимного нагружения с механическим способом покрытия электрических потерь осуществляется регулирование тока нагрузки испытываемых электромашин.

Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения электромашин, позволяющая реализовать варианты механического способа покрытия электрических потерь, представлена на рис. 1 [1]. На данной схеме: M – обмотки электромашин, испытываемой в режиме двигателя; G – обмотки электромашин, испытываемой в режиме генератора; ПМ – преобразователь механической мощности; К – конвертор напряжения (тока).

Преобразователь механической мощности может включать в себя источник механического момента, источник угловой скорости, конвертор механического момента (угловой скорости) [1]. Первый и второй из названных устройств являются активными элементами (источниками мощности), третий – пассивным. Наличие хотя бы одного из активных элементов – обязательно для обеспечения взаимного нагружения электромашин. Конвертор напряжения «К» осуществляет трансформацию напряжения генератора $U_{\text{Г}}$ в напряжение на

двигателе U_d с коэффициентом передачи напряжения k_U . Обмотки возбуждения генератора G и двигателя M запитываются токами $i_{вГ}$ и $i_{вД}$ соответственно.

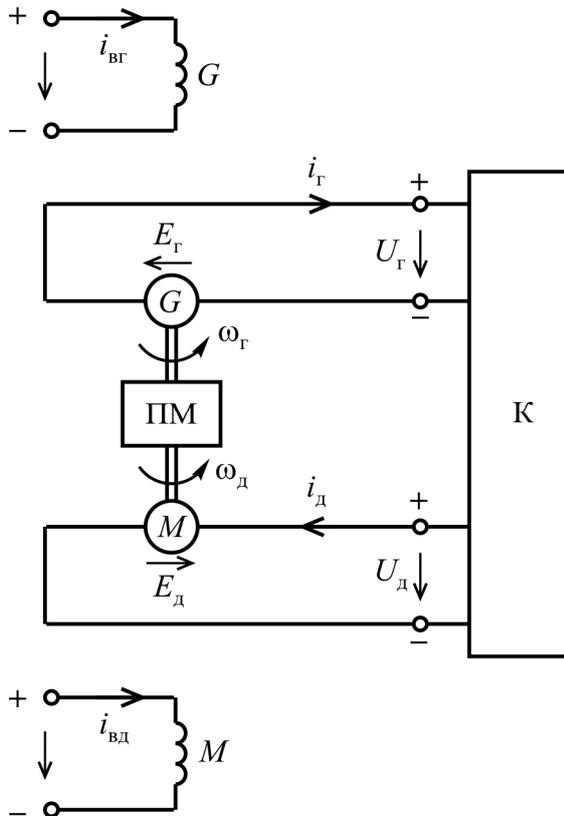


Рис. 1. Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения

При механическом способе компенсации электрических потерь [1] регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ сводится к регулированию небалансной э. д. с. ΔE и, как следствие, тока I_Γ . Эти параметры связаны между собой уравнением [2]

$$\Delta E = I_\Gamma R_\Sigma + L_\Sigma \frac{di_\Gamma}{dt},$$

где R_Σ , L_Σ – эквивалентные, приведенные к цепи генератора активное сопротивление и индуктивность электрического контура соответственно.

Структурная схема регулирования тока I_Γ представлена на рис. 2.

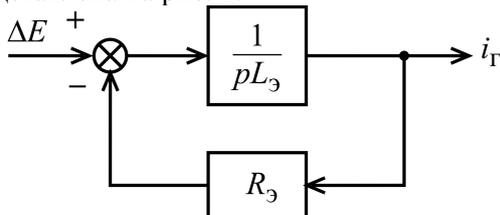


Рис. 2. Структурная схема регулирования тока

В стационарном режиме

$$I_\Gamma = \frac{\Delta E}{R_\Sigma}.$$

В общем виде небалансная э. д. с. может быть представлена как

$$\Delta E = E_\Gamma - E'_d, \quad (1)$$

где E_Γ , E'_d – э. д. с. генератора и приведенная э. д. с. двигателя соответственно.

Приведенное значение э. д. с. двигателя в общем виде может быть выражено как

$$E'_d = \frac{E_d}{k_U},$$

где E_d – э. д. с. испытуемого двигателя.

$$E_\Gamma = c\Phi_\Gamma\omega_\Gamma; E_d = c\Phi_d\omega_d.$$

Учитывая то, что создание небалансной э. д. с. используется для покрытия электрических потерь источником механической мощности [2], можно считать, что ΔE по формуле (1) всегда положительна.

Выразив э. д. с. генератора и двигателя через магнитные потоки и угловые скорости, после преобразований получим

$$\Delta E = c \left(\Phi_\Gamma\omega_\Gamma - \frac{1}{k_U}\Phi_d\omega_d \right), \quad (2)$$

Рассмотрим возможные способы регулирования величины ΔE изменением параметров преобразователей системы взаимного нагружения.

В качестве параметров, определяющих величину ΔE , будем рассматривать: разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, разность угловых скоростей $\Delta\omega$ и коэффициент передачи напряжения конвертора k_U [2].

Данные параметры определяются выражениями:

$$\Delta\Phi = \Phi_\Gamma - \Phi_d, \Delta\omega = \omega_\Gamma - \omega_d; k_U = \frac{U_d}{U_\Gamma},$$

где U_d и U_Γ – напряжения на испытуемом двигателе и генераторе соответственно.

Уравнение баланса напряжений в статическом режиме для всех схем с таким способом покрытия электрических потерь будет иметь вид

$$\Delta E = \sum \Delta U,$$

где $\sum \Delta U$ – суммарное падение напряжения в контуре тока нагрузки испытуемых электромашин.

Проведём анализ характера регулирования небалансной э. д. с. изменением каждого из упомянутых параметров отдельно.

Результаты

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения разности магнитных потоков, при котором:

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

Тогда выражение (2) может быть преобразовано к виду

$$\Delta E = c\Delta\Phi \cdot \omega.$$

При постоянной частоте вращения испытуемых электромашин ($\omega = const$) зависимость $\Delta E(\Delta\Phi)$ является прямо пропорциональной.

Графически характер зависимостей $\Delta E(\Delta\Phi)$ при различных значениях стабилизированной угловой скорости ω приведен на рис. 3.

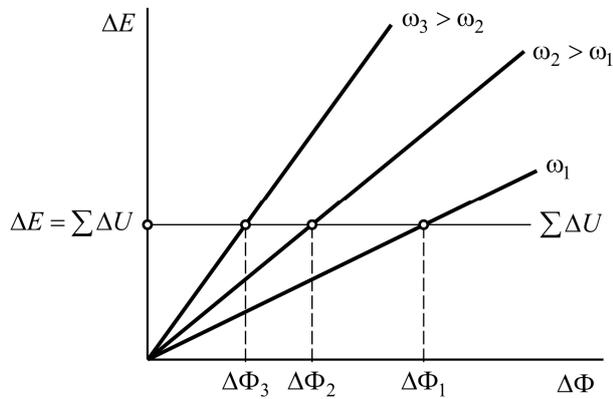


Рис. 3. Характер зависимостей $\Delta E(\Delta\Phi)$

Из рис. 3 видно, что при большем значении угловой скорости ω для компенсации заданного значения $\Sigma\Delta U$ требуется меньшее значение разности магнитных потоков $\Delta\Phi$.

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

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения разности угловых скоростей, при котором:

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

В данном варианте принято условие $\Delta\Phi \neq 0$. Отметим, что в реальных условиях достаточно часто наблюдается расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин и условие $\Delta\Phi = 0$ является частным для любого варианта регулирования режимом взаимного нагружения.

Тогда выражение (2) может быть записано в виде

$$\Delta E = c(\Phi_{Г}\omega_{Г} - \Phi_{Д}\omega_{Д}).$$

После преобразования это же выражение можно записать в двух видах:

$$\Delta E = c(\Phi_{Г} \cdot \Delta\omega + \Delta\Phi \cdot \omega_{Д});$$

$$\Delta E = c(\Delta\Phi\omega_{Г} + \Phi_{Д}\Delta\omega).$$

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин ($\Phi_{Д} = \Phi_{Г}$)

$$\Delta E = c\Phi\Delta\omega.$$

Графически характеристики $\Delta E(\Delta\omega)$ для условия $\Phi = const$ и $\Delta\Phi = 0$ представлены на рис. 4.

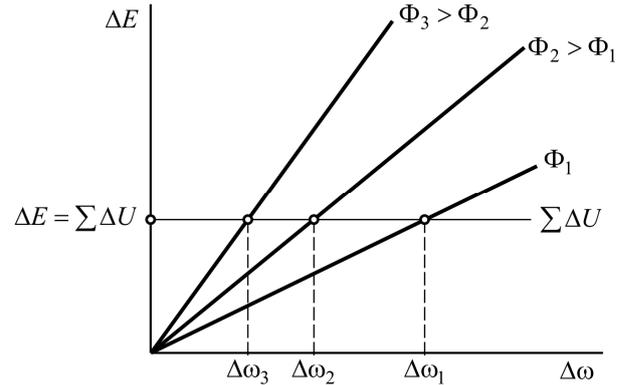


Рис. 4. Характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для $\Delta\Phi = 0$

При $\Delta\Phi = 0$ зависимость $\Delta E(\Delta\omega)$ – прямо пропорциональна. При $\Delta\Phi \neq 0$ зависимость $\Delta E(\Delta\omega)$ является линейной. На рис. 5 показан характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для трех условий: $\Delta\Phi = 0$; $\Delta\Phi > 0$; $\Delta\Phi < 0$.

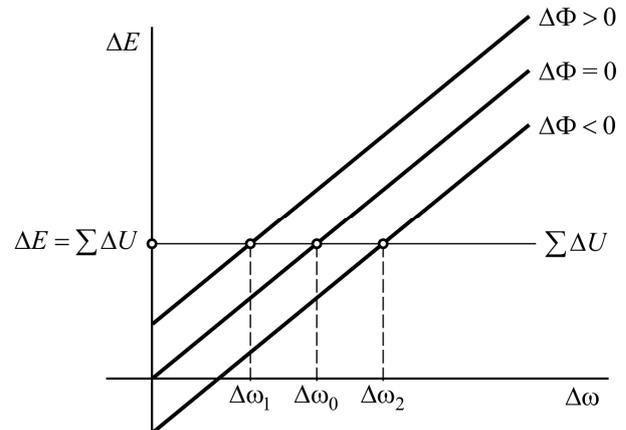


Рис. 5. Характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для $\Delta\Phi \neq 0$

Как видно из графиков на рис. 5, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин ($\Delta\Phi < 0$) для создания заданного значения разности э. д. с. ΔE требуется разность угловых скоростей $\Delta\omega$, большая, чем для случая совпадения магнитных характе-

ристик ($\Delta\Phi = 0$). При положительной разности $\Delta\Phi > 0$ необходимое значение $\Delta\omega$ меньше, чем при $\Delta\Phi = 0$.

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения коэффициента передачи напряжения, при котором:

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

В данном варианте условие $\Delta\Phi \neq 0$ принято их тех же соображений, что и в предыдущем, при регулировании $\Delta\omega$.

Выражение (2) для данного условия будет иметь вид

$$\Delta E = c\omega \left(\Phi_{\Gamma} - \frac{1}{k_U} \Phi_{\text{Д}} \right).$$

После преобразований получим это же уравнение в виде

$$\Delta E = c\omega \left[\Phi_{\Gamma} \left(1 - \frac{1}{k_U} \right) + \frac{1}{k_U} \Phi_{\text{Д}} \right].$$

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин

$$\Delta E = \left(1 - \frac{1}{k_U} \right) E_{\Gamma}.$$

Качественно характеристики $\Delta E(k_U)$ для условия $E_{\Gamma} = const$ и $\Delta\Phi = 0$ представлены на рис. 6.

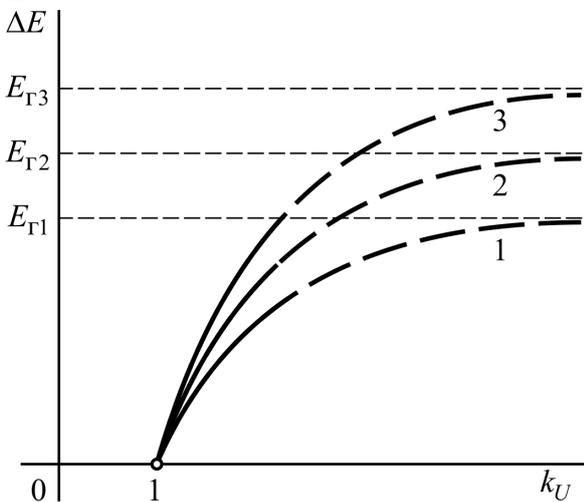


Рис. 6. Характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для $\Delta\Phi = 0$

В рассматриваемых вариантах системы взаимного нагружения коэффициент передачи напряжения k_U всегда больше единицы.

На рис. 7 качественно представлен характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для случая расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин ($\Delta\Phi \neq 0$).

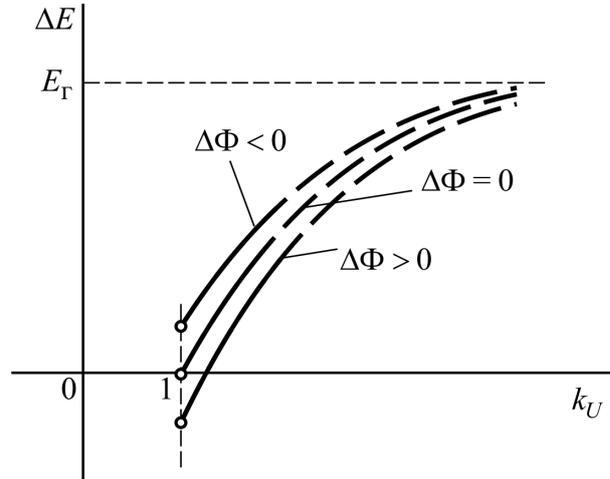


Рис. 7. Характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для $\Delta\Phi \neq 0$

Как видно из графиков на рис. 7, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин ($\Delta\Phi < 0$) для создания заданного значения небалансной э. д. с. ΔE требуется коэффициент передачи напряжения k_U , больший, чем для случая совпадения магнитных характеристик ($\Delta\Phi = 0$). При положительной разности $\Delta\Phi > 0$ необходимое значение k_U меньше, чем при $\Delta\Phi = 0$.

Выводы

Небалансная электродвижущая сила якорей взаимно нагруженных тяговых электромашин обеспечивает небалансную электромагнитную мощность, необходимую для реализации механического способа покрытия электрических потерь в испытуемых электромашинах.

Регулирование небалансной электродвижущей силы взаимно нагруженных тяговых электромашин может осуществляться изменением разницы магнитных потоков, разницы угловых скоростей вращения якорей электромашин и коэффициента передачи напряжения конвертора.

При взаимном нагружении тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками необходим более широкий диапазон регулирования магнитных потоков испытуемых электромашин, чем в случае совпадения магнитных характеристик.

Рациональность каждого из рассмотренных вариантов регулирования режима взаимного нагружения тяговых электромашин будет определяться их типовыми параметрами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
2. Афанасов А. М. Регулирование небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – Вип. 87. – С. 84-87.
3. Бочаров, В. И. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка, В. П. Янов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
4. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
5. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
6. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины: учеб. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
7. Лоза, П. О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – С. 69–71.
8. Лоза, П. О. Покращення енергетичних та інших показників приймально-здавальних випробувань тягових двигунів електровозів / П. О. Лоза // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27 – С. 81–83.
9. Правила ремонту электрических машин электровозов і електропоїздів. ЦТ-0204. – К.: Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.
10. 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, issue 2. – P. 1194-1206.

Поступила в печать 25.09.2014.

Ключевые слова: тяговая электрическая машина, взаимная нагрузка, электромагнитная мощность, электродвижущая сила, регулирование.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

REFERENCES

1. Afanasov A. M. *Sistemy vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo i pulsiruyushchego toka* [System of mutual loading traction electric machines constant and ripple current]. Dnipropetrovsk. Makovetsky Publ., 2012. 248 p.
2. Afanasov A. M. *Regulirovanie nebalansnoy elektromagnitnoy moshchnosti v sistemakh vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektromashin* [Regulation unbalanced electromagnetic power systems of electric traction load mutual]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical Engineering and Automation], 2011, issue 87, pp. 84-87.
3. Bocharov V. I., Vasilenko G. V., Kurochka A. L., Yanov V. P. *Magistralnye elektrovozy. Tyagovye elektricheskije mashiny* [Mainline electric locomotives. Traction electric machines]. Moscow, Energoatom Publ., 1992. – 464 p.
4. gost 2582-81. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovye*. [State Standard 2582-81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 34 p.
5. Zherve G. K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
6. Zakharchenko D. D. Rotanov D. D. *Tyagovye elektricheskije mashiny* [Traction electric machines]. Moscow, Transport Publ., 1991. 343 p.
7. Loza P. O. *Pokrashchennyya energetichnikh vlastivostey stenda dlya viprobuvan kolektornikh tyagovykh dviguniv lokomotiviv* [Improving energy properties stand for testing collector locomotive traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazarianana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 69–71.
8. Loza P. O. *Pokrashchennyya energetichnikh ta inshikh pokaznikov priymalno-zdavalnikh viprobuvan tyagovykh dviguniv elektrovoziv* [Improving energy and other performance acceptance testing electric locomotives traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazarianana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 81–83.
9. *Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektrovoziv* [Rules repair of electric machines of electric locomotives and electric trains]. TsT-0204. – Kyiv, Publishing House «SAM», 2012. 286 p.
10. 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.

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Рассмотрены вопросы регулирования режимов взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока при проведении их испытаний. Рассмотрены системы взаимной нагрузки электрических машин с механическим способом покрытия электрических потерь. Показано, что в таких системах основным способом управления режимом взаимного нагружения электромашин является регулирование их небалансной электромагнитной мощности путем изменения небалансной э. д. с. якорей. Проведен анализ возможных способов регулирования небалансной э. д. с. взаимно нагруженных электромашин. Получены аналитические и графические зависимости небалансной э. д. с. от таких управляющих параметров как разность магнитных потоков электромашин, разность угловых скоростей и коэффициент передачи напряжения преобразователя электрической мощности. Рассмотрены варианты управления режимом взаимного нагружения тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий 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

РЕГУЛЮВАННЯ НЕБАЛАНСНОЇ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ВЗАЄМНО НАВАНТАЖЕНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН ПОСТІЙНОГО ТА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

Розглянуті питання регулювання режимів взаємного навантаження тягових електричних машин постійного і пульсуючого струму при проведенні їх випробувань. Розглянуті системи взаємного навантаження електричних машин з механічним способом покриття електричних втрат. Показано, що в таких системах основним способом керування режимом взаємного навантаження електромашин є регулювання їх небалансної електромагнітної потужності шляхом змінення небалансної е. р. с. якорів. Проведений аналіз можливих способів регулювання небалансної е. р. с. взаємно навантажених електромашин, отримані аналітичні та графічні залежності небалансної е. р. с. від таких керуючих параметрів як різниця магнітних потоків електромашин, різниця кутових швидкостей та коефіцієнт передачі напруги перетворювача електричної потужності. Розглянуто варіанти керування режимом взаємного навантаження тягових електромашин з розбіжними магнітними характеристиками.

Ключові слова: тягова електрична машина, взаємне навантаження, електромагнітна потужність, електрорухомий сила, регулювання.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV (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

REGULATION UNBALANCED ELECTROMOTIVE FORCES OF MUTUAL LADEN TRACTION ELEKTROMASHINA DC AND PULSATING CURRENT

The questions of mutual control modes of loading traction electric machines and constant pulsating current during their tests. The systems of mutual loading of electrical machines with mechanical method coating electrical losses. Shown that in such systems the main control method of mutual loading of electrical machines is to regulate their unbalanced electrical magnetic power by changing the unbalanced e. d. f. anchors. The analysis of possible methods of regulation unbalanced e. d. f. one-loaded electrical machines, analytical and graphical dependencies unbalanced e. d. f. on such control parameters as the difference between the magnetic flux electrical machines, and the difference between the angular speeds coefficient of the inverter voltage transfer electrical power. The variants of the control regime of mutual loading traction electric machines with divergent magnetic characteristics.

Keywords: traction electric machine, mutual loading, electric power magnetic, electric driving force, regulation.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*