

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ – д. т. н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, afanasof@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4609-2361

А. Е. ДРУБЕЦКИЙ – аспирант, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, drubetskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5691-0925

РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕБАЛАНСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В СИСТЕМЕ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин [4, 10]. 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 электромашинами [11–13]. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для покрытия потерь мощности в испытываемых электромашин [1, 7–9].

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 за счёт разности либо электродвижущих сил электромашин, либо разности их электромагнитных моментов [5].

Цель

Целью данной работы является определение принципов регулирования небалансного электромагнитного момента 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 [1, 2]

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

где $P_{эмг}$, $P_{эмд}$ – электромагнитные мощности испытываемых генератора и двигателя соответственно [3, 6].

$$P_{эмг} = c\Phi_{г}\omega_{г}I_{г}, P_{эмд} = c\Phi_{д}\omega_{д}I_{д},$$

где c – конструктивная постоянная однотипных испытываемых электромашин; $\Phi_{г}$, $\Phi_{д}$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно; $\omega_{г}$, $\omega_{д}$ – угловые

скорости вращения якорей генератора и двигателя соответственно; I_g , I_d – токи якорей генератора и двигателя соответственно.

Путем изменения $\Delta P_{эм}$ в системах взаимного нагружения с электрическим способом покрытия потерь холостого хода осуществляется регулирование угловой скорости испытуемых электромашин.

Схема системы взаимного нагружения электромашин, позволяющая реализовать один из возможных вариантов электрического способа покрытия потерь холостого хода, представлена на рис. 1.

На данной схеме: M – обмотки электромашин, испытуемой в режиме двигателя; G – обмотки электромашин, испытуемой в режиме генератора; ИИ – источник напряжения; РОП – регулятор ослабления поля генератора.

Преимуществами данной схемы являются:

- наличие только одного источника электрической мощности;
- отсутствие источников высокого напряжения;
- одинаковая тепловая нагрузка обмоток якорей испытуемых электромашин.

К недостаткам данной схемы относятся:

- расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытуемых электромашин;
- необходимость в системе автоматического регулирования.

Данный вариант системы взаимного нагружения является рациональным для всех типов электрических машин тягового подвижного состава, как для тяговых электрических двигателей, так и для вспомогательных электрических машин [1].

При электрическом способе покрытия потерь холостого хода регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ сводится к регулированию небалансного электромагнитного момента $\Delta M_{эм}$ и, как

следствие, угловой скорости ω_d . Эти параметры связаны между собой уравнением [2]

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

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

Структурная схема регулирования угловой скорости ω_d представлена на рис. 2.

Небалансный электромагнитный момент испытуемых генератора и двигателя, приведенный к валу двигателя, может быть выражен как

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

где $M_{эмд}$, $M'_{эмг}$ – электромагнитный момент двигателя и приведенный электромагнитный момент генератора соответственно.

Приведенный электромагнитный момент генератора можно представить в виде

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

где $M_{эмг}$ – электромагнитный момент испытуемого генератора; k_ω – коэффициент передачи угловой скорости редуктора Р.

$$M_{эмг} = c\Phi_g I_g; M_{эмд} = c\Phi_d I_d.$$

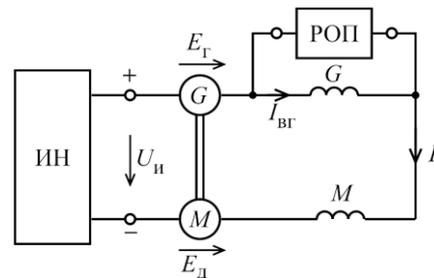


Рис. 1. Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения

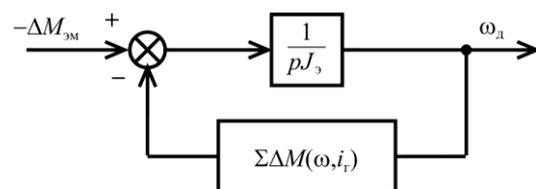


Рис. 2. Структурная схема регулирования угловой скорости

Выразив электромагнитные моменты двигателя и генератора через магнитные потоки и токи, после преобразований получим

$$\Delta M_{эм} = c(\Phi_d I_d - k_\omega \Phi_r I_r). \quad (1)$$

Рассмотрим один из возможных способов регулирования величины $\Delta M_{эм}$ путём изменения разности магнитных потоков электромашин $\Delta\Phi$ [1, 2].

$$\Delta\Phi = \Phi_d - \Phi_r.$$

Уравнение баланса моментов в статическом режиме для всех схем взаимной нагрузки с электрическим способом компенсации потерь холостого хода будет иметь вид [2]

$$\Delta M_{эм} = \sum \Delta M.$$

Результаты

Рассмотрим вариант регулирования $\Delta M_{эм}$ путём изменения разности магнитных потоков, при котором:

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

Тогда выражение (1) может быть преобразовано к виду

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

При постоянстве тока якорей испытуемых электромашин ($I = \text{const}$) зависимость $\Delta M_{эм}(\Delta\Phi)$ является прямо пропорциональной. Графически характер зависимости $\Delta M_{эм}(\Delta\Phi)$ для различных значений стабилизированного тока якорей I приведен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при большем токе нагрузки I испытуемых электромашин для компенсации заданной суммы потерь моментов $\sum \Delta M$ требуется меньшее значение разности магнитных потоков $\Delta\Phi$.

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

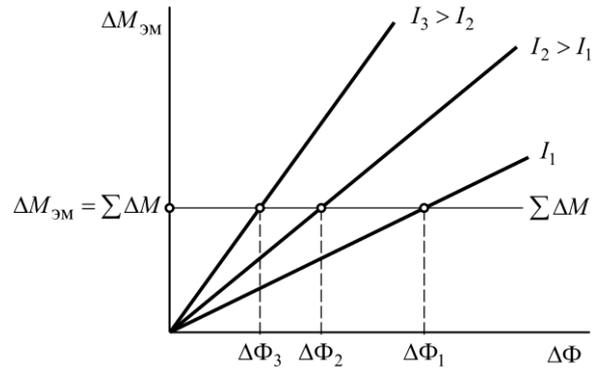


Рис. 3. Характер зависимости $\Delta M_{эм}(\Delta\Phi)$

При этом следует отметить, что с ростом тока нагрузки испытуемых электромашин увеличивается степень насыщения их магнитных систем, и для обеспечения одной и той же разности магнитных потоков требуется большая разница токов возбуждения двигателя и генератора.

На рис. 4 качественно приведен график зависимости разности магнитных потоков $\Delta\Phi$ от тока нагрузки I [2]. Из графика видно, что зависимость $\Delta\Phi(I)$ имеет экстремум в точке $I_{экс}$, при этом значении тока нагрузки разница $\Delta\Phi$ максимальна.

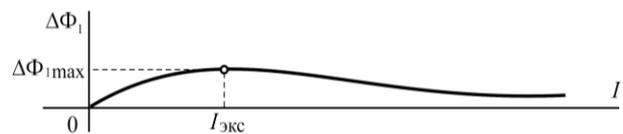


Рис. 4. Характер зависимости $\Delta\Phi(I)$

Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин может вызывать как увеличение, так и уменьшение требуемой разницы магнитных потоков и токов возбуждения двигателя и генератора.

Необходимо отметить, что система взаимного нагружения с электрическим способом покрытия потерь холостого хода на интервале изменения тока $[0; I_{экс}]$ может быть электромеханически неустойчивой. Раздельное независимое регулирование тока нагрузки и частоты вращения якорей электромашин (или испытательного напряжения) в данной системе взаимного нагру-

жения возможно только при использовании системы автоматического управления.

Система автоматического управления режимом взаимного нагружения должна быть двухконтурной. Первый контур должен обеспечивать стабилизацию тока нагрузки, а второй контур – стабилизацию частоты вращения. Структурная схема системы автоматического управления представлена на рис. 5.

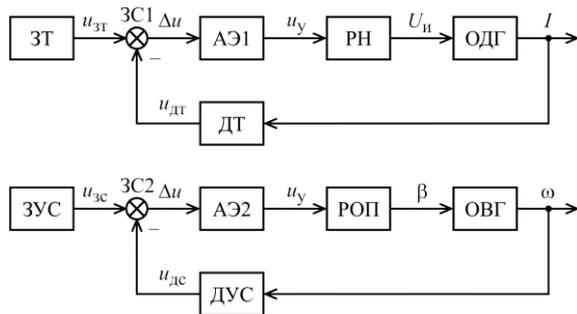


Рис. 5. Функциональная схема системы автоматического регулирования

Первый контур автоматического регулирования включает в себя: задатчик тока ЗТ, датчик тока ДТ, звено сравнения токов ЗС1, астатический элемент АЭ1, регулятор напряжения РН, обмотки двигателя и генератора ОДГ.

Второй контур автоматического регулирования включает в себя: задатчик угловой скорости ЗУС, датчик угловой скорости ДУС, звено сравнения ЗС2, астатический элемент АЭ2, регулятор ослабления поля РОП, обмотку возбуждения генератора ОВГ.

Научная новизна и практическая ценность

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, использование которых упростит разработку алгоритмов управления стендами для испытания тяговых электрических

машин подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Выводы

Небалансный электромагнитный момент взаимно нагруженных тяговых электромашин обеспечивает небалансную электромагнитную мощность, необходимую для реализации электрического способа покрытия потерь холостого хода в испытуемых электромашинах.

Регулирование небалансного электромагнитного момента взаимно нагруженных тяговых электромашин может осуществляться изменением разницы токов якорей, разницы магнитных потоков и разницы угловых скоростей вращения якорей электромашин.

При взаимном нагружении тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками необходим более широкий диапазон регулирования магнитных потоков испытуемых электромашин.

Библиографический список

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. Визначення еквівалентного струму навантаження при випробовуванні тягових електродвигунів на нагрівання без вентиляції / П. О. Лоза, Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 26–29.
8. 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.
9. 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.
10. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0204. К. : Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.

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

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

Keywords: traction electrical machines, testing, loading mutual electromagnetic moment, regulation.

Рецензенти:

д. т. н., проф. Г. К. Гетьман,
д. т. н., проф. Ф. П. Шкрабец.

Поступила в редколлегию 01.11.2016.

Принята к печати 09.11.2016.