

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПОСОБА КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРИ ИХ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКЕ

Наведено аналіз енергетичних показників процесу компенсації магнітних і механічних втрат у схемах взаємного навантаження тягових електродвигунів з використанням джерела електричної потужності.

Приведен анализ энергетических показателей процесса компенсации магнитных и механических потерь в схемах взаимной нагрузки тяговых электродвигателей с использованием источника электрической мощности.

The analysis of power indices of process of compensation of magnetic and mechanical losses in the charts of mutual loading of hauling electric motors with the use of electric power source is resulted.

Известно два основных способа компенсации магнитных и механических потерь в схемах взаимной нагрузки электрических машин. Это способ компенсации потерь источником механической мощности (дополнительный двигатель) и способ компенсации потерь источником электрической мощности [1]. В первом варианте механическая мощность дополнительного источника непосредственно компенсирует механические и магнитные потери, которые создают тормозные моменты на валах испытуемых электромашин. Во втором варианте для компенсации тормозных моментов, обусловленных магнитными и механическими потерями, требуется предварительное преобразование электрической мощности дополнительного источника в механическую испытуемым двигателем. Реализация такого способа компенсации может быть осуществлена целым рядом технических решений, отличающихся друг от друга самими конфигурациями принципиальных схем. Выбор рациональной конфигурации схемы испытательного стенда для каждого типа тяговых электромашин является одним из направлений решения задачи снижения расходов на их испытания. Критерием рациональности выбранного способа такой компенсации может быть принят условный коэффициент полезного действия процесса преобразования электрической мощности дополнительного источника в добавочную механическую мощность на валу испытуемого двигателя.

Рассмотрим процесс компенсации механических и магнитных потерь в испытуемых электромашинах источником электрической мощности. Такая компенсация обеспечивается за счет превышения электромагнитной мощно-

стью двигателя одноименной мощности генератора [2]. Характер преобразования и передачи мощности в двигателе для данного варианта показан в виде структурной схемы, представленной на рис. 1.

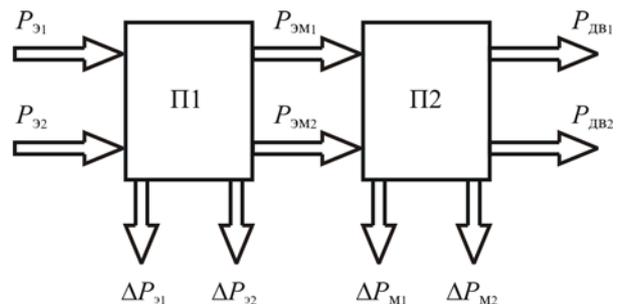


Рис. 1

Условно электрическая машина, работающая в двигательном режиме, энергетически разделена на две части. Первая часть П1 является преобразователем электрической мощности в электромагнитную, вторая часть П2 является преобразователем электромагнитной мощности в механическую.

К двигателю в стенде взаимной нагрузки подводится два условных потока электрической энергии: мощностью  $P_{э1}$  – от цепи испытуемого генератора и мощностью  $P_{э2}$  – от дополнительного источника. В результате преобразования в первой части П1 возникает две условных соответствующих электромагнитной мощности  $P_{эм1}$  и  $P_{эм2}$ .

Отметим, что деление общей мощности двигателя на два потока, как и деление самого двигателя на два преобразователя, условно и вызвано лишь характером принятого метода анализа энергетических процессов. Будем рас-

смагивать преобразование условных составляющих мощности независимо друг от друга. При этом будем учитывать, что ни электрические, ни магнитные потери в испытуемом электродвигателе не являются величинами, пропорциональными подведенной электрической мощности, и принцип суперпозиции для данного анализа неприемлем.

Преобразование каждой из электрических мощностей  $P_{\text{э1}}$  и  $P_{\text{э2}}$  в электромагнитные мощности  $P_{\text{эм1}}$  и  $P_{\text{эм2}}$  сопровождается соответствующими электрическими потерями  $\Delta P_{\text{э1}}$  и  $\Delta P_{\text{э2}}$ .

В результате преобразования электромагнитных мощностей  $P_{\text{эм1}}$  и  $P_{\text{эм2}}$  во второй части двигателя П2 возникает две соответствующих составляющих механической мощности  $P_{\text{дв1}}$  и  $P_{\text{дв2}}$ . Преобразование каждой из составляющих электромагнитной мощности  $P_{\text{эм1}}$  и  $P_{\text{эм2}}$  в механические  $P_{\text{дв1}}$  и  $P_{\text{дв2}}$  сопровождается соответствующими механическими и магнитными потерями  $\Delta P_{\text{м1}}$  и  $\Delta P_{\text{м2}}$ .

Отметим, что все магнитные и механические потери  $\sum \Delta P_{\text{м}}$  в стенде взаимной нагрузки рассматриваемого варианта компенсируется за счет добавочной электромагнитной мощности электродвигателя [2]

$$\sum \Delta P_{\text{м}} = P_{\text{эм2}}. \quad (1)$$

Каждый из процессов преобразования мощности можно охарактеризовать своим условным коэффициентом полезного действия (к.п.д.). Для преобразователя П1 это будет к.п.д.  $\eta_{11}$ , который характеризует преобразование  $P_{\text{э1}}$  в  $P_{\text{эм1}}$ , и к.п.д.  $\eta_{12}$ , который характеризует преобразование  $P_{\text{э2}}$  в  $P_{\text{эм2}}$ . Выражения для определения данных к.п.д. будут иметь вид:

$$\eta_{11} = \frac{P_{\text{эм1}}}{P_{\text{э1}}}; \quad (2)$$

$$\eta_{12} = \frac{P_{\text{эм2}}}{P_{\text{э2}}}. \quad (3)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{э2}} = P_{\text{эм2}} + \Delta P_{\text{э2}}, \quad (4)$$

выражение для определения к.п.д.  $\eta_{12}$  может быть представлено в виде

$$\eta_{12} = \frac{P_{\text{эм2}}}{P_{\text{эм2}} + \Delta P_{\text{э2}}}. \quad (5)$$

Для преобразователя П2 также будут характерны два к.п.д. преобразований каждой из составляющих мощности  $P_{\text{эм1}}$  и  $P_{\text{эм2}}$ . Это будет к.п.д.  $\eta_{21}$ , характеризующий преобразование  $P_{\text{эм1}}$  в  $P_{\text{дв1}}$  и к.п.д.  $\eta_{22}$ , характеризующий преобразование  $P_{\text{эм2}}$  в  $P_{\text{дв2}}$ . Выражения для определения данных к.п.д. будут иметь вид:

$$\eta_{21} = \frac{P_{\text{дв1}}}{P_{\text{эм1}}}; \quad (6)$$

$$\eta_{22} = \frac{P_{\text{дв2}}}{P_{\text{эм2}}}. \quad (7)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{дв2}} = P_{\text{эм2}} - \Delta P_{\text{м2}}, \quad (8)$$

выражение для определения к.п.д.  $\eta_{22}$  может быть представлено в виде

$$\eta_{22} = \frac{P_{\text{эм2}} - \Delta P_{\text{м2}}}{P_{\text{эм2}}}. \quad (9)$$

Результирующий к.п.д. преобразования  $P_{\text{э1}}$  в  $P_{\text{дв1}}$  определяется как произведение условных коэффициентов  $\eta_{11}$ ,  $\eta_{21}$ , и является в своей сущности к.п.д. двигателя  $\eta_{\text{дв}}$ , соответствующим основным составляющим его э.д.с. и силы тока. С допустимой для данного анализа степенью упрощения можно считать этот к.п.д. независимым от дополнительной электрической мощности  $P_{\text{э2}}$ .

$$\eta_{\text{дв}} = \eta_{11} \cdot \eta_{21}. \quad (10)$$

Результирующий к.п.д. преобразования электрической мощности дополнительного источника  $P_{\text{э2}}$  в добавочную механическую мощность на валу двигателя  $P_{\text{дв2}}$  может быть определен в виде

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{12} \cdot \eta_{22}. \quad (11)$$

Основная электромагнитная мощность двигателя  $P_{\text{эм1}}$ , которая представляет собою преобразованную электрическую мощность цепи испытуемого генератора  $P_{\text{э1}}$ , определяется в виде

$$P_{\text{эм1}} = E \cdot I, \quad (12)$$

где  $E$  и  $I$  – основные составляющие э.д.с. и силы тока якоря двигателя, обеспечиваемые мощностью цепи генератора.

Добавочная электромагнитная мощность  $P_{эм2}$ , которая возникает в результате преобразования электрической мощности дополнительного источника и компенсирует все магнитные и механические потери в стенде взаимной нагрузки, определяется в виде суммы произведений

$$P_{эм2} = \Delta I \cdot E + I \cdot \Delta E + \Delta I \cdot \Delta E, \quad (13)$$

где  $\Delta E$  и  $\Delta I$  – добавочные э.д.с. и сила тока, создаваемые дополнительным источником электрической мощности  $P_{э2}$ .

Из формулы (13) имеем три варианта условия компенсации магнитных и механических потерь:

$$а) \quad \begin{cases} \Delta E = 0; \\ \Delta I > 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$б) \quad \begin{cases} \Delta E > 0; \\ \Delta I = 0; \end{cases} \quad (15)$$

$$в) \quad \begin{cases} \Delta E > 0; \\ \Delta I > 0. \end{cases} \quad (16)$$

Наиболее целесообразными из приведенных вариантов являются варианты «а» и «б» [3]. Вариант «в» является случаем сочетания вариантов «а» и «б».

Примером конструктивного решения варианта «а» является классическая схема взаимной нагрузки с использованием вольтодобавочной машины и подпитки якоря двигателя током линейного генератора. Примером конструктивного решения варианта «б» является схема взаимной нагрузки Потье, в которой положительная разница э.д.с. якорей двигателя и генератора обеспечивается соответствующей разницей токов возбуждения испытуемых электромашин [1].

Рассмотрим особенности энергетических процессов, присущие каждому варианту. Суммарные электрические потери в условном преобразователе П1

$$\Delta P_3 = (I + \Delta I)^2 R, \quad (17)$$

где  $R$  – сопротивление цепи двигателя.

Учитывая, что  $\Delta P_3 = \Delta P_{31} + \Delta P_{32}$ , условно разделив общую сумму по выражению (17) на соответствующие составляющие, получим:

$$\Delta P_{31} = I^2 R; \quad (18)$$

$$\Delta P_{32} = (2 \cdot I \cdot \Delta I + \Delta I^2) \cdot R. \quad (19)$$

К потерям  $\Delta P_{32}$  по формуле (19) отнесены все дополнительные электрические потери в двигателе, вызванные добавочным током  $\Delta I$ . Здесь необходимо отметить, что потери  $\Delta P_{31}$  и часть потерь  $\Delta P_{32}$ , равная  $I \cdot \Delta I \cdot R$ , компенсируется за счет электрической мощности цепи испытуемого генератора  $P_{31}$ , а часть потерь  $P_{32}$ , равная  $(I \Delta I + \Delta I)^2 R$ , компенсируется за счет электрической мощности дополнительного источника  $P_{э2}$ .

Суммарные магнитные и механические потери  $\Delta P_{M1}$  и  $\Delta P_{M2}$  представляют собою суммы:

$$\Delta P_{M1} = \Delta P_{Mag1} + \Delta P_{Mех1}; \quad (20)$$

$$\Delta P_{M2} = \Delta P_{Mag2} + \Delta P_{Mех2}, \quad (21)$$

где  $\Delta P_{Mag1}$  и  $\Delta P_{Mех1}$  – магнитные и механические потери в электродвигателе соответственно, обусловленные основной составляющей э.д.с.  $E$ ;

$\Delta P_{Mag2}$  и  $\Delta P_{Mех2}$  – дополнительные магнитные и механические потери в электродвигателе, обусловленные добавочной э.д.с.  $\Delta E$ .

Магнитные потери в условном преобразователе П2 при постоянной частоте вращения якоря двигателя [4]

$$\Delta P_{Mag} = K_M (E + \Delta E)^2, \quad (22)$$

где  $K_M$  – постоянная, зависящая от конструкции электромашины и частоты перемагничивания якоря.

Учитывая, что  $\Delta P_{Mag} = \Delta P_{Mag1} + \Delta P_{Mag2}$ , условно разделив суммарные потери  $\Delta P_{Mag}$  по выражению (22) на соответствующие составляющие, получим:

$$\Delta P_{Mag1} = K_M E^2; \quad (23)$$

$$\Delta P_{Mag2} = K_M (2E \Delta E + \Delta E^2). \quad (24)$$

К потерям  $\Delta P_{Mag2}$  по формуле (24) отнесены все дополнительные магнитные потери в электродвигателе, вызванные добавочной э.д.с.  $\Delta E$ .

Отметим, что и потери  $\Delta P_{Mag1}$ , и потери  $\Delta P_{Mag2}$  компенсируются только за счёт электрической мощности  $P_{э2}$  дополнительного источника.

Механические потери в условном преобразователе П2 при неизменной частоте вращения якоря электродвигателя постоянны и не зависят от выбранного варианта их компенсации.

$$\Delta P_{\text{мех1}} = \text{const}; \Delta P_{\text{мех2}} = 0.$$

Ни добавочный ток якоря  $\Delta I$ , ни добавочная э.д.с.  $\Delta E$  не влияют на механические потери в электромашинах  $\Delta P_{\text{мех}}$ .

Суммарные магнитные и механические потери в преобразователе П2:

$$\Delta P_{\text{м1}} = K_{\text{м}} E^2 + \Delta P_{\text{мех1}}; \quad (25)$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = K_{\text{м}} (2E \Delta E + \Delta E^2). \quad (26)$$

Формулы (18), (19), (25), (26), полученные в проведенном анализе, являются общими для любого из трёх вариантов компенсации магнитных и механических потерь источником электрической мощности («а», «б», «в»).

Для варианта «а» будут справедливы частные выражения:

$$\Delta P_{\text{32}} = (2I \Delta I + \Delta I^2) R; \quad (27)$$

$$\Delta I = \frac{\sum \Delta P_{\text{м}}}{E}; \quad (28)$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = 0; \quad (29)$$

$$\eta_{12} = \frac{\sum \Delta P_{\text{м}}}{\sum \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{32}}}; \quad (30)$$

$$\eta_{22} = 1; \quad (31)$$

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{12}. \quad (32)$$

Для варианта «б» эти же параметры будут определяться в виде:

$$\Delta P_{\text{32}} = 0; \quad (33)$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = K_{\text{м}} (2E \Delta E + \Delta E^2); \quad (34)$$

$$\Delta E = \frac{\sum \Delta P_{\text{м}}}{I}; \quad (35)$$

$$\eta_{12} = 1; \quad (36)$$

$$\eta_{22} = \frac{\sum \Delta P_{\text{м}} - \Delta P_{\text{м2}}}{\sum \Delta P_{\text{м}}}; \quad (37)$$

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{22}. \quad (38)$$

Предварительный анализ выражений (27) – (38) показывает, что выбор рационального варианта компенсации магнитных и механических потерь в схеме взаимной нагрузки будет определяться для заданной типовой мощности испытуемых электромашин номинальным значением тока якоря и относительными значениями каждого из видов потерь (электрических, магнитных, механических). Критерием рациональности для любого из вариантов будет минимум к.п.д. преобразования электрической мощности дополнительного источника в добавочную механическую мощность на валу испытуемого двигателя:

$$\eta_{\text{пр}} \rightarrow \text{min}. \quad (39)$$

Полученные в результате проведенного анализа выражения (27) – (38) являются универсальными и будут справедливы для любой конфигурации принципиальной схемы стэнда взаимной нагрузки с использованием электрического способа компенсации магнитных и механических потерь в испытуемых электромашинах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. Афанасов, А. М. Энергетические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 34-38.
3. Афанасов, А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 42-46.
4. Афанасов, А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 77-80.

Поступила в редколлегию 20.04.2010.

Принята к печати 19.05.2010.