

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО СПОСОБА КОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРИ ИХ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКЕ

Наведено аналіз енергетичних показників процесу компенсації електричних втрат у схемах взаємного навантаження тягових електродвигунів з використанням джерела механічної потужності.

Ключові слова: тяговий електродвигун, компенсація електричних втрат, схема взаємного навантаження, джерело механічної потужності

Приведен анализ энергетических показателей процесса компенсации электрических потерь в схемах взаимной нагрузки тяговых электродвигателей с использованием источника механической мощности.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, компенсация электрических потерь, схема взаимной нагрузки, источник механической мощности

The analysis of power indices of process of compensation of electric losses in the schemes of mutual loading of hauling electric motors with the use of source of mechanical power is presented.

Keywords: hauling electric motor, compensation of electric losses, scheme of mutual loading, source of mechanical power

Известно два основных способа компенсации электрических потерь в схемах взаимной нагрузки электрических машин. Это способ компенсации потерь источником электрической мощности и способ компенсации потерь источником механической мощности [1]. В первом варианте электрическая мощность дополнительного источника (например, вольтодобавочной машины) непосредственно компенсирует электрические потери, которые создают падения напряжения в цепях испытуемых электромашин и преобразователей. Во втором варианте для компенсации падений напряжения, обусловленных электрическими потерями, требуется предварительное преобразование механической мощности дополнительного источника в добавочную электрическую мощность испытуемым генератором. 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 данного 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 эффективности преобразования механической мощности дополнительного источника в добавочную электрическую мощность на выходе генератора.

Рассмотрим процесс компенсации электрических потерь в испытуемых электромашинах источником механической мощности. Такая компенсация обеспечивается за счёт превышения электромагнитной мощностью генератора одноименной мощности двигателя. Характер преобразования и передачи мощности в испытуемом генераторе показан на рис. 1.

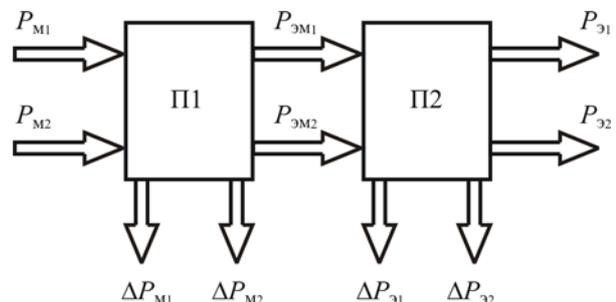


Рис. 1

Условно электромашина, работающая в режиме генератора, энергетически разделена на две части. Первая часть П1 является преобразователем механической мощности на валу генератора в электромагнитную, вторая часть П2 является преобразователем электромагнитной мощности в электрическую.

К генератору, испытуемому по методу взаимной нагрузки, подводится два условных потока механической энергии: мощностью P_{M1} – от испытуемого двигателя и мощностью P_{M2} – от дополнительного источника. В результате преобразования в первой части П1 возникает

две условные составляющие электромагнитной мощности $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{эм2}}$.

Деление общей мощности генератора на две составляющие, как и деление самой электромашины на два преобразователя, условно и вызвано характером принятого метода исследования энергетических процессов. Преобразование каждой из этих составляющих мощности будем рассматривать отдельно. При этом будем учитывать, что потери мощности в генераторе не пропорциональны подведенной механической мощности и принцип суперпозиции для данного анализа неприемлем.

Преобразование каждой из составляющих $P_{\text{м1}}$ и $P_{\text{м2}}$ в электромагнитные мощности $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{эм2}}$ сопровождается соответствующими механическими и магнитными потерями $\Delta P_{\text{м1}}$ и $\Delta P_{\text{м2}}$.

В результате преобразования во второй части генератора П2 электромагнитных мощностей $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{эм2}}$ в соответствующие электрические мощности $P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$ возникают электрические потери $\Delta P_{\text{э1}}$ и $\Delta P_{\text{э2}}$ соответственно.

Все электрические потери в испытуемых электромашинах и преобразователях $\sum \Delta P_{\text{э}}$ компенсируются при таком способе за счёт добавочной электромагнитной мощности генератора [2]

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

Каждый из процессов преобразования мощности можно охарактеризовать своим условным коэффициентом энергетической эффективности преобразования мощности. Для преобразователя П1 это будет два коэффициента энергетической эффективности k_{11} и k_{12} , которые характеризуют преобразования $P_{\text{м1}}$ в $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{м2}}$ в $P_{\text{эм2}}$ соответственно. Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$k_{11} = \frac{P_{\text{эм1}}}{P_{\text{м1}}}; \quad (2)$$

$$k_{12} = \frac{P_{\text{эм2}}}{P_{\text{м2}}}. \quad (3)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{м2}} = P_{\text{эм2}} + \Delta P_{\text{м2}}, \quad (4)$$

выражение для определения k_{12} может быть представлено в виде

$$k_{12} = \frac{P_{\text{эм2}}}{P_{\text{эм2}} + \Delta P_{\text{м2}}}. \quad (5)$$

Для преобразователя П2 также будут характерны два коэффициента энергетической эффективности. Один k_{21} будет соответствовать процессу преобразования $P_{\text{эм1}}$ в $P_{\text{э1}}$, а другой k_{22} – процессу преобразования $P_{\text{эм2}}$ в $P_{\text{э2}}$. Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$k_{21} = \frac{P_{\text{э1}}}{P_{\text{эм1}}}; \quad (6)$$

$$P_{\text{эм2}} k_{22} = \frac{P_{\text{э2}}}{P_{\text{эм2}}}. \quad (7)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{э2}} = P_{\text{эм2}} - \Delta P_{\text{э2}}, \quad (8)$$

выражение (7) может быть преобразовано к виду:

$$k_{22} = \frac{P_{\text{эм2}} - \Delta P_{\text{э2}}}{P_{\text{эм2}}}. \quad (9)$$

Результирующий коэффициент энергетической эффективности преобразования $P_{\text{м1}}$ в $P_{\text{э1}}$ определяется как произведение коэффициентов k_{11} и k_{21} и является в своей сути коэффициентом полезного действия испытуемого генератора $\eta_{\text{г}}$. С допустимой для данного анализа степенью упрощения можно считать, что этот к.п.д. не зависит от дополнительной механической мощности на валу генератора $P_{\text{м2}}$.

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

Результирующий коэффициент эффективности преобразования механической мощности дополнительного источника $P_{\text{м2}}$ в добавочную электрическую мощность на выходе генератора $P_{\text{э2}}$ может быть определен как

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

Основная электромагнитная мощность генератора $P_{\text{эм1}}$, которая является преобразованной механической мощностью на валу генератора $P_{\text{м1}}$, поступающей от испытуемого двигателя, определяется в виде:

$$P_{\text{эм1}} = M_{\text{эм}} \cdot \omega, \quad (12)$$

где $M_{\text{эм}}$ и ω – основные составляющие электромагнитного момента и угловой скорости вала генератора соответственно, обеспечиваемые мощностью двигателя.

Добавочная электромагнитная мощность $P_{\text{эм2}}$, которая возникает в результате преобразования механической мощности дополнительного источника и компенсирует все электрические потери в стенде взаимной нагрузки, определяется в виде

$$P_{\text{эм2}} = \Delta M_{\text{эм}} \cdot \omega + M_{\text{эм}} \cdot \Delta \omega + \Delta M_{\text{эм}} \cdot \Delta \omega, \quad (13)$$

где $\Delta M_{\text{эм}}$ и $\Delta \omega$ – добавочные электромагнитный момент и угловая скорость, создаваемые дополнительным источником механической мощности $P_{\text{м2}}$.

Из формулы (13) имеем три варианта условия компенсации электрических потерь:

$$\text{а) } \begin{cases} \Delta M_{\text{эм}} > 0; \\ \Delta \omega = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{б) } \begin{cases} \Delta M_{\text{эм}} = 0; \\ \Delta \omega > 0; \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{в) } \begin{cases} \Delta M_{\text{эм}} > 0; \\ \Delta \omega > 0. \end{cases} \quad (16)$$

Варианты «б» и «в» требуют использования источника угловой скорости, который при передаче неизменного момента будет обеспечивать добавку угловой скорости вращения вала к входному значению скорости вращения [3].

Наиболее целесообразным с точки зрения простоты технической реализации является вариант «а». Примером конструктивного решения этого варианта является схема взаимной нагрузки Гопкинсона с использованием дополнительного электродвигателя, непосредственно соединённого с валами испытуемых электромашин. Положительная разница электромагнитных моментов испытуемых генератора и двигателя в этой схеме обеспечивается за счёт соответствующей разницы токов возбуждения электромашин. При этом предусматривается их независимое возбуждение [1].

Варианты «б» и «в» требуют использование либо конвертора, либо источника угловой скорости. Конвертор (редуктор) является пассивным преобразователем механической мощности и требует использование дополнительного источника этой мощности. Источник угловой

скорости представляет собой устройство, которое при передаче неизменного момента будет обеспечивать на выходном валу добавку угловой скорости вращения к значению скорости вращения входного вала. Таким образом, это устройство само является источником механической мощности в отличие от конвертора.

Рассмотрим особенности энергетических процессов в схемах взаимного нагружения по каждому из вариантов, не вдаваясь в технические подробности их схемной реализации.

Основной электромагнитный момент генератора может быть представлен в виде [4]:

$$M_{\text{эм}} = c\Phi I, \quad (17)$$

где c – конструктивная постоянная испытуемой электромашины – генератора;

Φ – магнитный поток генератора;

I – ток якоря генератора.

Добавочный электромагнитный момент генератора будет определяться в виде суммы

$$\Delta M_{\text{эм}} = c(\Phi \cdot \Delta I + \Delta \Phi \cdot I + \Delta \Phi \cdot \Delta I), \quad (18)$$

где $\Delta \Phi$ и ΔI – добавочные значения магнитного потока и тока якоря генератора, обеспечивающие электромагнитный момент $\Delta M_{\text{эм}}$.

Таким образом, условие $\Delta M_{\text{эм}} > 0$ может быть выполнено путём сочетания соотношений $\Delta \Phi$ и ΔI по трём вариантам:

$$\text{г) } \begin{cases} \Delta \Phi > 0; \\ \Delta I = 0; \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{д) } \begin{cases} \Delta \Phi = 0; \\ \Delta I > 0; \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{е) } \begin{cases} \Delta \Phi > 0; \\ \Delta I > 0. \end{cases} \quad (21)$$

Следовательно, каждое из условий (14) и (16) будет распадаться на три варианта по (19)–(21).

Для примера приведем сочетание условий «а» и «г» по системам (14) и (19) соответственно:

$$\begin{cases} \Delta \Phi > 0; \\ \Delta I = 0; \\ \Delta \omega = 0. \end{cases}$$

Потери $\Delta P_{\text{м1}}$ и $\Delta P_{\text{м2}}$ в преобразователе П1 представляют собою соответствующие суммы магнитных и механических потерь:

$$\Delta P_{M1} = \Delta P_{\text{маг1}} + \Delta P_{\text{мех1}}; \quad (22)$$

$$\Delta P_{M2} = \Delta P_{\text{маг2}} + \Delta P_{\text{мех2}}, \quad (23)$$

где $\Delta P_{\text{маг1}}$ и $\Delta P_{\text{мех1}}$ – магнитные и механические потери в генераторе соответственно, обусловленные основными составляющими электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$ и угловой скорости ω ;

$\Delta P_{\text{маг2}}$ и $\Delta P_{\text{мех2}}$ – дополнительные магнитные и механические потери в генераторе соответственно, вызванные добавочными значениями электромагнитного момента $\Delta M_{\text{эм}}$ и угловой скорости $\Delta\omega$.

Магнитные потери при преобразовании основной составляющей мощности P_{M1} в $P_{\text{эм1}}$ могут быть представлены в виде [4,5]

$$\Delta P_{\text{маг1}} = (k_{\text{в}}\omega^2 + k_{\text{г}}\omega)\Phi^2, \quad (24)$$

где $k_{\text{в}}$ и $k_{\text{г}}$ – коэффициенты пропорциональности магнитных потерь от вихревых токов и гистерезиса соответственно.

Суммарные магнитные потери $\Delta P_{\text{маг}}$ при преобразовании двух условных мощностей P_{M1} и P_{M2} в $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{эм2}}$ в общем виде будут определяться как

$$\Delta P_{\text{маг}} = [k_{\text{в}}(\omega + \Delta\omega)^2 + k_{\text{г}}(\omega + \Delta\omega)](\Phi + \Delta\Phi)^2. \quad (25)$$

После преобразований выражение (25) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{маг}} = & (K_{\text{в}}\omega^2 + K_{\text{г}}\omega)\Phi^2 + \\ & + [k_{\text{в}}(2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2) + k_{\text{г}}\Delta\omega](\Phi + \Delta\Phi) + \\ & + (k_{\text{в}}\omega^2 + k_{\text{г}}\omega)(2\Phi\Delta\Phi + \Delta\Phi)^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Тогда, учитывая, что $\Delta P_{\text{маг}} = \Delta P_{\text{маг1}} + \Delta P_{\text{маг2}}$, условно разделив сумму (26) на соответствующие составляющие $\Delta P_{\text{маг1}}$ и $\Delta P_{\text{маг2}}$, получим выражение для $\Delta P_{\text{маг2}}$ в виде

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{маг2}} = & [k_{\text{в}}(2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2) + k_{\text{г}}\Delta\omega](\Phi + \Delta\Phi) + \\ & + (k_{\text{в}}\omega^2 + k_{\text{г}}\omega)(2\Phi\Delta\Phi + \Delta\Phi)^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Механические потери при преобразовании основной составляющей P_{M1} в $P_{\text{эм1}}$ могут быть представлены для электромашин с независимой вентиляцией в виде:

$$\Delta P_{\text{мех1}} = a\omega^2 + b\omega, \quad (28)$$

где a и b – постоянные коэффициенты.

Суммарные механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ при преобразовании двух условных составляющих мощности P_{M1} и P_{M2} в $P_{\text{эм1}}$ и $P_{\text{эм2}}$ в общем виде будут определяться как

$$\Delta P_{\text{мех}} = a(\omega + \Delta\omega)^2 + b(\omega + \Delta\omega). \quad (29)$$

После преобразований уравнение (29) может быть представлено в виде:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (a\omega^2 + b) + (2a\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2 + b\Delta\omega). \quad (30)$$

Тогда, учитывая, что $\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех1}} + \Delta P_{\text{мех2}}$, условно разделив сумму (30) на составляющие $\Delta P_{\text{мех1}}$ и $\Delta P_{\text{мех2}}$, получим:

$$\Delta P_{\text{мех2}} = 2a\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2 + b\Delta\omega. \quad (31)$$

Суммарные электрические потери в условном преобразователе П2 могут быть представлены в виде:

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

где R – сопротивление электрической цепи генератора.

Учитывая, что $\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{э1}} + \Delta P_{\text{э2}}$, условно разделив сумму на соответствующие составляющие, получим:

$$\Delta P_{\text{э1}} = I^2 R; \quad (33)$$

$$\Delta P_{\text{э2}} = (2I\Delta I + \Delta I^2)R. \quad (34)$$

Полученные в анализе формулы (27), (31), (34) являются универсальными для всех сочетаний условий (14)–(16) с условиями (19)–(21).

Для случая сочетания условий (14) и (19) (схема Гопкинсона) будут справедливы частные выражения:

$$\Delta P_{\text{маг2}} = (k_{\text{в}}\omega^2 + k_{\text{г}}\omega)(2\Phi\Delta\Phi + \Delta\Phi^2); \quad (35)$$

$$\Delta\Phi = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}}}{c \cdot \omega \cdot I}; \quad (36)$$

$$\Delta P_{\text{мех2}} = 0; \quad (37)$$

$$\Delta P_{\text{э2}} = 0; \quad (38)$$

$$\Delta P_{M2} = \Delta P_{\text{маг2}}; \quad (39)$$

$$k_{12} = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}}}{\sum \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{M2}}; \quad (40)$$

$$k_{22}=1; \quad (41)$$

$$k_{\text{пр}}=k_{12}. \quad (42)$$

Для варианта «б» (применение конвертора механической мощности) будут иметь место другие частные выражения:

$$\Delta P_{\text{маг2}} = [K_{\text{в}}(2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2) + K_{\text{г}}\Delta\omega] \cdot \Phi; \quad (43)$$

$$\Delta\omega = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}}}{c \cdot \Phi \cdot I}; \quad (44)$$

$$\Delta P_{\text{мех2}} = (2a\omega + \Delta\omega + b)\Delta\omega; \quad (45)$$

$$\Delta P_{\text{э2}} = 0; \quad (46)$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = \Delta P_{\text{маг2}} + \Delta P_{\text{мех2}}; \quad (47)$$

$$k_{12} = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}}}{\sum \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м2}}}; \quad (48)$$

$$k_{22}=1; \quad (49)$$

$$k_{\text{пр}}=k_{12}. \quad (50)$$

Для сочетания условий «а» и «д» (использование конвертора напряжения или тока) частные выражения будут иметь вид:

$$\Delta P_{\text{маг2}} = 0; \quad (51)$$

$$\Delta P_{\text{мех2}} = 0; \quad (52)$$

$$\Delta P_{\text{э2}} = (2I\Delta I + \Delta I^2)R; \quad (53)$$

$$\Delta I = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}}}{c \cdot \Phi \cdot \omega}; \quad (54)$$

$$\Delta P_{\text{м2}} = 0; \quad (55)$$

$$k_{12}=1; \quad (56)$$

$$k_{22} = \frac{\sum \Delta P_{\text{э}} - \Delta P_{\text{э2}}}{\sum \Delta P_{\text{э}}}; \quad (57)$$

$$k_{\text{пр}}=k_{22}. \quad (58)$$

Предварительный анализ выражений (35) – (58) показывает, что выбор рационального варианта компенсации электрических потерь в схеме взаимной нагрузки будет определяться

для заданной типовой мощности испытуемых электромашин номинальными значениями тока якоря и частоты вращения, а также относительными значениями каждого из видов потерь (электрических, магнитных, механических). Критерием рациональности для любого из вариантов будет минимум коэффициента энергетической эффективности преобразования механической мощности дополнительного источника в добавочную электрическую мощность на выходе испытуемого генератора.

$$k_{\text{пр}} \rightarrow \min. \quad (59)$$

Полученные в результате проведенного анализа выражения (35) – (58) являются универсальными и будут справедливы для любой конфигурации принципиальной схемы стенда взаимной нагрузки с использованием механического способа компенсации электрических потерь в испытуемых электромашин.

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. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 42-46.
4. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
5. 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. 58-62.

Поступила в редколлегию 14.05.2010.

Принята к печати 26.05.2010.