

А.М. Афанасов, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта)

РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕБАЛАНСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

Выбор оптимального способа компенсации потерь мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин является основным направлением решения задачи повышения энергетической эффективности стендов для их испытания.

В большинстве вариантов систем взаимного нагружения электромашин постоянного тока используется принцип компенсации одного из видов потерь (электрических, холостого хода) путем создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых генератора и двигателя [1].

Представим данную небалансную электромагнитную мощность в виде разницы

$$\Delta P_{\text{эм}} = P_{\text{эмГ}} - P_{\text{эмД}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{эмГ}}$, $P_{\text{эмД}}$ – электромагнитные мощности испытуемых генератора и двигателя соответственно.

$$P_{\text{эмГ}} = c \Phi_{\text{Г}} \omega_{\text{Г}} I_{\text{Г}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{эмД}} = c \Phi_{\text{Д}} \omega_{\text{Д}} I_{\text{Д}}, \quad (3)$$

где c – конструктивная постоянная однопольных испытуемых 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.

При механическом способе компенсации электрических потерь

$$\Delta P_{\text{эм}} > 0,$$

а при электрическом способе компенсации потерь холостого хода

$$\Delta P_{\text{эм}} < 0.$$

Объединив формулы (1)-(3), после ввода новых обозначений получим выражение для небалансной электромагнитной мощности в общем виде

$$\Delta P_{эм} = c(\Phi_{Г} I_{Г} \Delta\omega + \Phi_{Г} \Delta I \omega_{д} + \Delta\Phi I_{д} \omega_{д}), \quad (4)$$

где $\Delta\Phi = \Phi_{Г} - \Phi_{д}$ – разность магнитных потоков генератора и двигателя;

$\Delta\omega = \omega_{Г} - \omega_{д}$ – разность угловых скоростей валов генератора и двигателя;

$\Delta I = I_{Г} - I_{д}$ – разность токов якорей генератора и двигателя.

Путем изменения $\Delta P_{эм}$ в системах взаимного нагружения осуществляется регулирование либо угловой скорости валов испытуемых электромашин, либо силы тока в обмотках их якорей.

Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения тяговых электромашин, позволяющая реализовать любой из способов компенсации потерь [2], представлена на рис. 1.

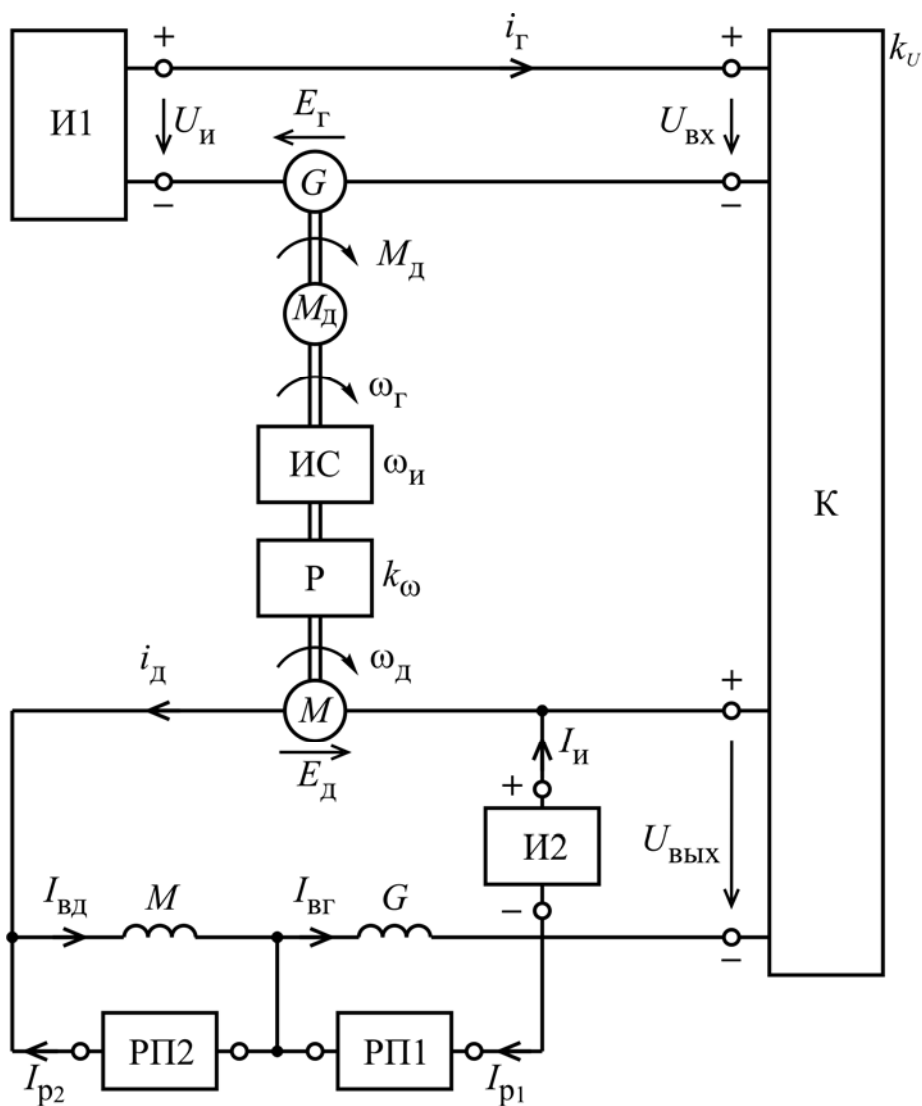


Рис. 1

Обмотка якоря электромашины, испытываемой в режиме генератора, G соединена последовательно с источником электрической мощности И1 (вольт-добавка) и подключена к входу конвертора напряжения (тока) К. К выходу конвертора К подключены соединенные последовательно обмотка якоря электромашины, испытываемой в режиме двигателя, M и обмотки возбуждения испытываемых электромашин M и G . Параллельно с выходом конвертора К включен источник электрической мощности И2. Параллельно каждой из обмоток возбуждения G и M подключены регуляторы поля РП1 и РП2 соответственно. регуляторы поля позволяют осуществлять отпитку-подпитку обмоток возбуждения. Валы испытываемых электромашин соединены между собой через редуктор Р (вариатор) и источник угловой скорости ИС (добавка скорости). Дополнительно к валу испытываемого генератора подсоединен двигатель M_d (источник момента).

Разница угловых скоростей валов испытываемых электромашин [3]

$$\Delta\omega = \omega_d (k_\omega - 1) + \omega_{\text{и}}, \quad (5)$$

где $\omega_{\text{и}}$ – добавка угловой скорости источника ИС;

k_ω – коэффициент передачи угловой скорости редуктора Р.

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

Разница токов якорей испытываемых электромашин [3]

$$\Delta I = I_d (k_U - 1) + I_{\text{и}} k_U, \quad (6)$$

где $I_{\text{и}}$ – сила тока источника И2;

k_U – коэффициент передачи по напряжению конвертора К.

Разница магнитных потоков испытываемых электромашин

$$\Delta\Phi = \Phi(I_{\text{вГ}}) - \Phi(I_{\text{вД}}), \quad (7)$$

где $I_{\text{вГ}}$, $I_{\text{вД}}$ – токи возбуждения генератора и двигателя соответственно.

$$I_{\text{вГ}} = I_d + I_{\text{р1}};$$

$$I_{\text{вД}} = I_d + I_{\text{р2}},$$

где $I_{\text{р1}}$, $I_{\text{р2}}$ – токи регуляторов поля РП1 и РП2 соответственно.

Для удобства пользования уравнением (4) имеет смысл выразить значение $\Delta P_{\text{эм}}$ либо только через параметры испытуемого двигателя ($\Phi_{\text{д}}$, $\omega_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$), либо только через параметры испытуемого генератора ($\Phi_{\text{г}}$, $\omega_{\text{г}}$, $I_{\text{г}}$). При этом уравнение (4) может быть представлено в двух видах:

$$\Delta P_{\text{эм}} = c(\Phi_{\text{д}} I_{\text{д}} \Delta \omega + \Phi_{\text{д}} \Delta I \omega_{\text{д}} + \Delta \Phi I_{\text{д}} \omega_{\text{д}} + \Delta \Phi \Delta I \omega_{\text{д}} + \Phi_{\text{д}} \Delta I \Delta \omega + \Delta \Phi I_{\text{д}} \Delta \omega + \Delta \Phi \Delta I \Delta \omega); \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{эм}} = c(\Phi_{\text{г}} I_{\text{г}} \Delta \omega + \Phi_{\text{г}} \Delta I \omega_{\text{г}} + \Delta \Phi I_{\text{г}} \omega_{\text{г}} - \Delta \Phi \Delta I \omega_{\text{г}} - \Phi_{\text{г}} \Delta I \Delta \omega - \Delta \Phi I_{\text{г}} \Delta \omega + \Delta \Phi \Delta I \Delta \omega). \quad (9)$$

Небалансная э.д.с. испытуемых генератора и двигателя, приведенная к цепи якорной обмотки генератора, может быть выражена как

$$\Delta E = E_{\text{г}} - E'_{\text{д}},$$

где $E_{\text{г}}$, $E'_{\text{д}}$ – э.д.с. генератора и приведенная э.д.с. двигателя соответственно.

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

$$E'_{\text{д}} = \frac{E_{\text{д}}}{k_{\text{У}}},$$

где $E_{\text{д}}$ – э.д.с. испытуемого двигателя.

$$E_{\text{г}} = c \Phi_{\text{г}} \omega_{\text{г}};$$

$$E_{\text{д}} = c \Phi_{\text{д}} \omega_{\text{д}}.$$

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

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

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

Приведенный электромагнитный момент генератора можно представить в виде

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

где $M_{\text{эмГ}}$ – электромагнитный момент испытуемого генератора.

$$M_{\text{эмГ}} = c\Phi_{\Gamma}I_{\Gamma};$$

$$M_{\text{эмД}} = c\Phi_{\text{Д}}I_{\text{Д}}.$$

При механическом способе компенсации электрических потерь регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{\text{эм}}$ сводится к регулированию небалансной э.д.с. ΔE и, как следствие, тока I_{Γ} [4]. Эти параметры связаны между собой уравнением

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

где $R_{\text{э}}$, $L_{\text{э}}$ – эквивалентные, приведенные к цепи генератора активное сопротивление и индуктивность электрического контура соответственно.

Структурная схема регулирования тока I_{Γ} представлена на рис. 2.

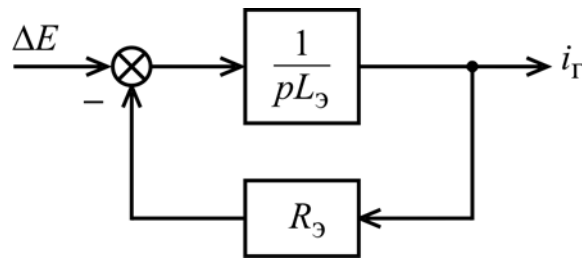


Рис. 2

В стационарном режиме

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

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{\text{эм}}$ сводится к регулированию небалансного электромагнитного момента $\Delta M_{\text{эм}}$ и, как следствие, угловой скорости $\omega_{\text{Д}}$ и напряжений на испытуемых электромашинах [5]. Эти параметры связаны между собой уравнением

$$-\Delta M_{\text{эм}} = \Delta M_{\text{хх}} + J_{\text{э}} \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt},$$

где $\Delta M_{\text{хх}}$, $J_{\text{э}}$ – потери момента, обусловленные потерями холостого хода, и эквивалентный момент инерции, приведенные к валу испытуемого двигателя.

Структурная схема регулирования угловой скорости ω_d представлена на рис. 3.

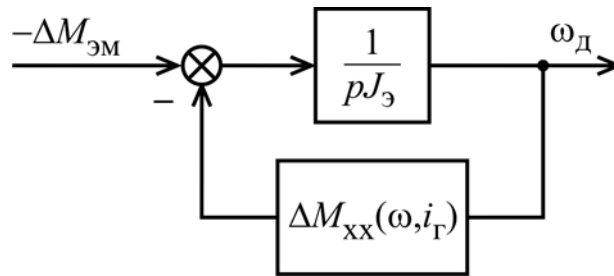


Рис. 3

Потери момента ΔM_{xx} для каждой из электромашин являются функцией угловой скорости ω и магнитного потока Φ . Магнитный поток Φ в каждой из электромашин определяется током возбуждения, зависящим от тока нагрузки I_Γ .

$$\Delta M_{xx} = f(\omega_d, i_\Gamma).$$

В стационарном режиме

$$\omega_d = f^*(-\Delta M_{эм}),$$

где f^* – функция, обратная f .

Каждому отдельно выбранному способу компенсации потерь мощности в системе взаимного нагружения электромашин будут соответствовать частные выражения для небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$, получаемые из уравнений (8) и (9). Для ряда вариантов системы взаимного нагружения: $\Delta\omega = 0$; $\Delta I = 0$. Как правило, $\Delta\Phi \neq 0$, что связано с частым расхождением магнитных характеристик испытуемых тяговых электромашин.

Принятый вариант регулирования небалансной электромагнитной мощности в системе взаимного нагружения тяговых электромашин определяет принципы управления испытательным стендом, структуру системы автоматического управления, её стоимость и энергетическую эффективность испытательной системы в целом.

Рациональность того или иного варианта системы взаимного нагружения определяется типовой мощностью тяговых электромашин, номинальным напряжением на коллекторе, типом тяговой передачи и долей отдельных видов потерь в суммарных потерях мощности в испытуемых электромашинах.

Список литературы

1. Афанасов А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник

Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 25 – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 258-262.

2. Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока [Текст] / А. М. Афанасов // Наук.-техн. збір. «Гірничя електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
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. Афанасов А. М. Условия компенсации механических и магнитных потерь при взаимной нагрузке тяговых электрических машин по схеме Потье [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 59-62.
5. Афанасов А. М. Компенсация электрических потерь при взаимной нагрузке тяговых электромашин по схеме Гопкинсона [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 34-37.