УДК 621.313.001.4

Андрей Афанасов

РЕГУЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ИХ ВЗАИМНОМ НАГРУЖЕНИИ

Приведены принципы регулирования магнитных потоков тяговых электрических машин при их испытании путем взаимной нагрузки с использованием одного источника электрической или механической мощности.

Приведені принципи регулювання магніт них пот оків т ягових елект ричних машин при їх випробуванні шляхом взаємного навант аж ення з використ анням одного дж ерела елект ричної або механічної пот уж ност і.

Principles of adjusting of magnetic streams of hauling electric machines at their test by the mutual loading with the use of one source of electric or mechanical power are resulted.

Ключевые слова: электрическая машина, испытание, взаимная нагрузка, магнитный поток, регулирование.

В ряде схем взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока используется принцип компенсации электрических потерь и потерь холостого хода путём создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых генератора и двигателя [1].

При механическом способе компенсации электрических потерь этот принцип выражается в виде

$$\sum \Delta P_{э} = P_{эмг} - P_{эмд}, \tag{1}$$

где $\sum \Delta P_{э}$ – суммарные электрические потери в стенде;

$P_{эмг}$ и $P_{эмд}$ – электромагнитные мощности испытуемых генератора и двигателя соответственно.

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода такой баланс мощностей будет иметь вид

$$\sum \Delta P_{хх} = P_{эмд} - P_{эмг}, \tag{2}$$

где $\sum \Delta P_{хх}$ – суммарные потери холостого хода в стенде.

Электромагнитные мощности испытуемых электромашин:

$$P_{эмг} = C\Phi_{г}\omega_{г}I_{г}, \tag{3}$$

$$P_{эмд} = C\Phi_{д}\omega_{д}I_{д}, \tag{4}$$

где C – конструктивная постоянная однотипных испытуемых электромашин;

$\Phi_г$, $\Phi_д$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

$\omega_г$, $\omega_д$ – скорости вращения валов генератора и двигателя соответственно;

$I_г$, $I_д$ – токи якорей генератора и двигателя соответственно.

Представим небалансную электромагнитную мощность в виде

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

Тогда при механическом способе компенсации электрических потерь $\Delta P_{эм} > 0$, а при электрическом способе компенсации потерь холостого хода $\Delta P_{эм} < 0$.

При создании небалансной электромагнитной мощности путём регулирования магнитных потоков испытуемых электромашин целесообразно обеспечение условий равенства их частот вращения и токов якорей:

$$\omega_г = \omega_д = \omega; \tag{5}$$

$$I_г = I_д = I. \tag{6}$$

При этих условиях

$$\Delta P_{эм} = C\omega I \Delta\Phi, \tag{7}$$

где $\Delta\Phi = \Phi_г - \Phi_д$ – разница магнитных потоков генератора и двигателя.

Универсальная схема взаимного нагружения, с помощью которой могут быть реализованы рассматриваемые принципы компенсации потерь, приведена на рис. 1.

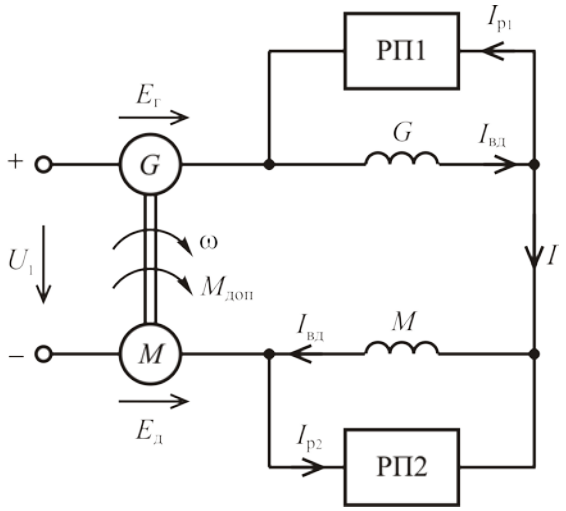

Рис. 1. **Универсальная схема взаимного нагружения**

Валы испытуемых генератора G и двигателя M соединены между собой. Обмотки якорей и возбуждения электромашин соединены в общую цепь последовательно.

Параллельно обмотке возбуждения генератора G подключен регулятор поля РП1, а параллельно обмотке возбуждения двигателя M – регулятор поля РП2. Токи возбуждения $I_{\text{вг}}$, $I_{\text{вд}}$, токи регуляторов поля $I_{\text{р1}}$, $I_{\text{р2}}$ и ток якорей электромашин I связаны между собою уравнениями Кирхгофа:

$$I_{\text{вг}} = I + I_{\text{р1}}; \tag{8}$$

$$I_{\text{вд}} = I + I_{\text{р2}}. \tag{9}$$

Положительные направления токов $I_{\text{р1}}$ и $I_{\text{р2}}$ соответствуют режиму подпитки обмоток возбуждения от регуляторов РП1 и РП2.

К схеме подведено внешнее напряжение U_1 электрического источника. К валам испытуемых электромашин приложен дополнительный момент $M_{\text{доп}}$ механического источника.

При электрическом способе: $M_{\text{доп}} = 0$; $U_1 = var$. При механическом способе: $U_1 = 0$; $M_{\text{доп}} = var$. В принципе возможен и смешанный способ: $M_{\text{доп}} = var$, $U_1 = var$, который является малоцелесообразным с точки зрения энергетической эффективности [2].

По схеме, приведенной на рис.1, возможны четыре основных условия создания небалансной электромагнитной мощности, каждому из которых будет соответствовать свой режим регулирования поля испытуемых электромашин.

Режим 1:

$$\begin{cases} I_{\text{р1}} > 0; \\ I_{\text{р2}} = 0. \end{cases} \tag{10}$$

Режим 2:

$$\begin{cases} I_{\text{р1}} = 0; \\ I_{\text{р2}} < 0. \end{cases} \tag{11}$$

Режим 3:

$$\begin{cases} I_{\text{р1}} = 0; \\ I_{\text{р2}} > 0. \end{cases} \tag{12}$$

Режим 4:

$$\begin{cases} I_{\text{р1}} < 0; \\ I_{\text{р2}} = 0. \end{cases} \tag{13}$$

Режимы 1 и 2 являются реализацией электрического, а режимы 3 и 4 – механического способов компенсации потерь.

Режимы 1 и 3 характерны подпиткой, а режимы 3 и 4 – отпиткой обмотки возбуждения одной из испытуемых электромашин.

Проведём качественный анализ двух основных вариантов регулирования поля без рассмотрения конкретных способов технических реализацией этих вариантов.

Вариант 1. Рассмотрим регулирование поля при постоянстве отношения тока возбуждения $I_в$ к току якоря I. Назовём это отношение коэффициентом возбуждения $k_в$.

$$k_в = \frac{I_в}{I} = const\,. \tag{14}$$

Для режима подпитки обмотки возбуждения $k_в > 1$, для режима отпитки – $k_в < 1$. При токе регулятора поля, равном нулю, $k_в = 1$.

Будем считать известной зависимость магнитного потока электромашины последовательного возбуждения от тока якоря $\Phi_о(I)$ при условии равенства тока возбуждения $I_в$ току якоря I ($k_в = 1$). Тогда в общем случае зависимость магнитного потока Φ электромашины от тока якоря I для режимов, при которых $k_в \neq 1$, будет иметь вид

$$\Phi(I) = \Phi_о\left(k_в \cdot I\right). \tag{15}$$

Разница магнитных потоков генератора и двигателя в общем виде будет определяться как

$$\Delta\Phi = \Phi_о\left(k_{вг} \cdot I\right) - \Phi_о\left(k_{вд} \cdot I\right). \tag{16}$$

где $k_{вг}$, $k_{вд}$ – коэффициенты возбуждения генератора и двигателя соответственно.

$$k_{вг} = \frac{I_{вг}}{I}; \tag{17}$$

$$k_{вд} = \frac{I_{вд}}{I}. \tag{18}$$

На рис. 2 зависимости магнитного потока электромашины от тока якоря приведены в графическом виде. Кривая $\Phi_о(I)$ соответствует режиму $k_в = 1$ (регулятор отключен), кривая $\Phi'(I)$ – режиму $k_в > 1$ (подпитка), а кривая $\Phi''(I)$ – режиму $k_в < 1$ (отпитка).

Кривые $\Phi'(I)$ и $\Phi''(I)$ представляют собой множество точек кривой $\Phi_о(I)$, смещённых влево и вправо соответственно, с изменением абсциссы I в $k_в$ раз.

На этом же рис. 2 приведены кривые зависимости $\Delta\Phi(I)$, качественно соответствующие четырем режимам регулирования поля: $\Delta\Phi_1(I)$ (режим 1); $\Delta\Phi_2(I)$ (режим 2); $\Delta\Phi_3(I)$ (режим 3); $\Delta\Phi_4(I)$ (режим 4).

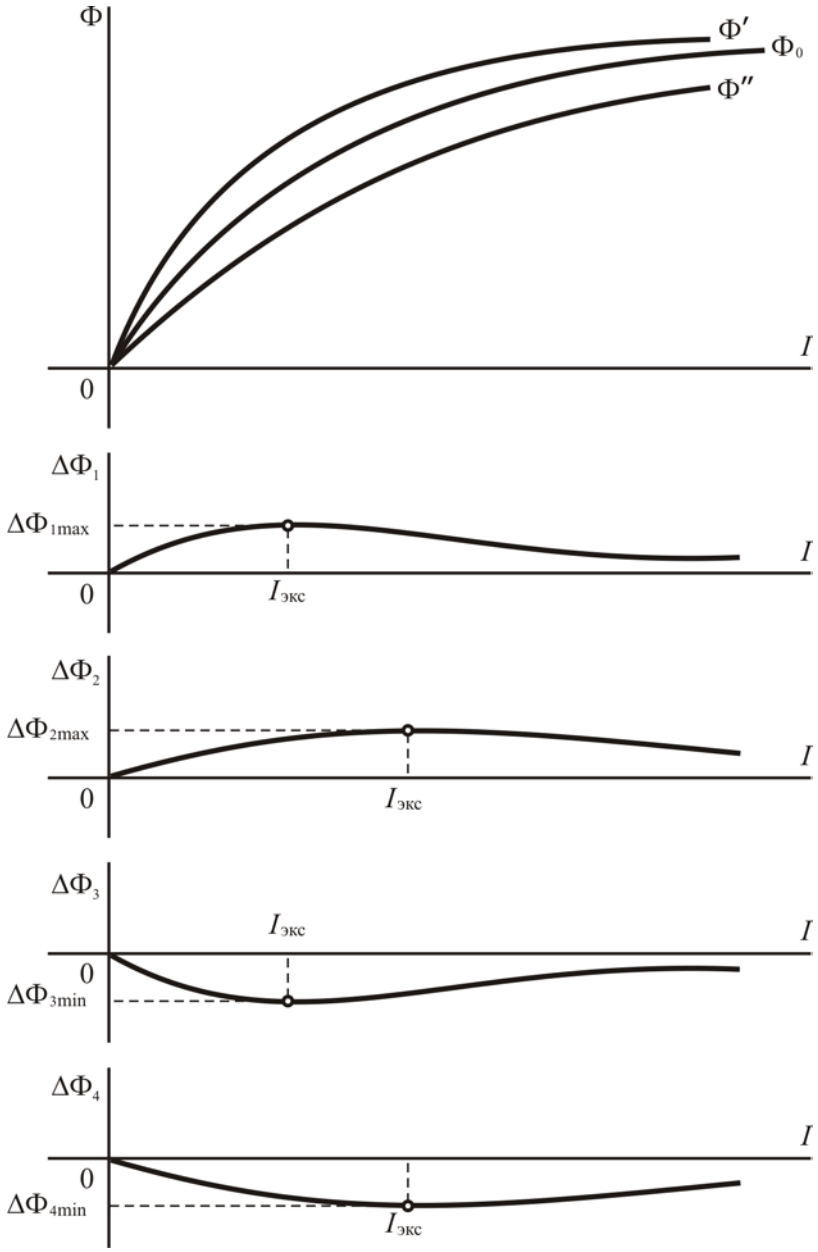

Рис. 2. **Зависимости разниц магнитных потоков от тока якоря**

Экстремум функции $\Delta\Phi(I)$ может быть найден из условия

$$\frac{d\Delta\Phi}{dI} = 0 \qquad (19)$$

или с учетом выражения для $\Delta\Phi$ (16)

$$\frac{d\Phi_{\text{о}}\left(k_{\text{вг}}I\right)}{dI}=\frac{d\Phi_{\text{о}}\left(k_{\text{вд}}I\right)}{dI}. \tag{20}$$

Количественная оценка зависимости $\Delta\Phi(I)$ требует либо табличной, либо аналитической формы записи характеристики $\Phi_{\text{о}}(I)$. Известен целый ряд аналитических выражений кривой намагничивания электрических машин, наилучшее приближение из которых дает выражение [3]

$$\Phi_{\text{о}}=A\cdot\operatorname{arctg}(B\cdot I), \tag{21}$$

где A, B – постоянные коэффициенты.

С учётом (21) выражение (16) принимает вид

$$\Delta\Phi(I)=A\left[\operatorname{arctg}\left(Bk_{\text{вг}}I\right)-\operatorname{arctg}\left(Bk_{\text{вд}}I\right)\right]. \tag{22}$$

Используя выражение (20), найдем точку экстремума функции $\Delta\Phi(I)$ в общем виде:

$$I_{\text{экс}}=\frac{1}{B\sqrt{k_{\text{вг}}\cdot k_{\text{вд}}}}; \tag{23}$$

$$\Delta\Phi_{\text{экс}}=A\left[\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{k_{\text{вг}}}{k_{\text{вд}}}}-\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{k_{\text{вд}}}{k_{\text{вг}}}}\right]. \tag{24}$$

При условии $k_{\text{вд}}=1$ (режимы 1 и 4):

$$I_{\text{экс}}=\frac{1}{\sqrt{k_{\text{вг}}}}; \tag{25}$$

$$\Delta\Phi_{\text{экс}}=A\left[\operatorname{arctg}\sqrt{k_{\text{вг}}}-\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1}{k_{\text{вг}}}}\right]. \tag{26}$$

При условии $k_{\text{вг}}=1$ (режимы 2 и 3):

$$I_{\text{экс}}=\frac{1}{\sqrt{k_{\text{вд}}}}; \tag{27}$$

$$\Delta\Phi_{\text{экс}}=A\left[\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1}{k_{\text{вд}}}}-\operatorname{arctg}\sqrt{k_{\text{вд}}}\right]. \tag{28}$$

Необходимо отметить, что при определённых параметрах испытуемых электромашин система взаимного нагружения с механическим способом компенсации электрических потерь на интервале изменения тока [0; $I_{экс}$) может быть электрически неустойчивой.

Вариант 2. Рассмотрим регулирование поля при постоянстве разницы тока возбуждения $I_в$ и тока якоря I. Эта разница представляет собой ток регулятора поля $I_р$

$$I_р = I_в - I = const. \tag{29}$$

Для режима подпитки обмотки возбуждения $I_р > 0$, для режима отпитки – $I_р < 0$. При отключенном регуляторе поля $I_р = 0$.

Также как и в первом варианте будем считать известной зависимость $\Phi_о(I)$, соответствующую условию $I_в = I$.

В общем случае зависимость магнитного потока Φ электромашины от тока якоря I для режимов, при которых $I_р \neq 0$, будет иметь вид

$$\Phi(I)=\Phi_о\left(I + I_р\right). \tag{30}$$

Разница магнитных потоков генератора и двигателя в общем виде будет определяться как

$$\Delta\Phi = \Phi_о\left(I + I_{р1}\right) - \Phi_о\left(I + I_{р2}\right). \tag{31}$$

На рис. 3 зависимости магнитного потока от тока якоря приведены в графическом виде. Кривая $\Phi_о(I)$ соответствует режиму $I_р = 0$ (регулятор отключен), кривая $\Phi'(I)$ – режиму $I_р > 0$ (подпитка), кривая $\Phi''(I)$ – режиму $I_р < 0$ (отпитка).

Кривые $\Phi'(I)$ и $\Phi''(I)$ представляют собой множество точек кривой $\Phi_о(I)$, смещённых влево и вправо соответственно на величину $\left|I_р\right|$.

На этом же рис. 3 приведены кривые зависимости $\Delta\Phi(I)$, качественно соответствующие четырём режимам регулирования поля: $\Delta\Phi_1(I)$ (режим 1); $\Delta\Phi_2(I)$ (режим 2); $\Delta\Phi_3(I)$ (режим 3); $\Delta\Phi_4(I)$ (режим 4).

Экстремум функции $\Delta\Phi(I)$ может быть найден из условия

$$\frac{d\Delta\Phi}{dI} = 0 \tag{32}$$

или с учетом выражения $\Delta\Phi(I)$ (31)

$$\frac{d\Phi_о\left(I + I_{р1}\right)}{dI} = \frac{d\Phi_о\left(I + I_{р2}\right)}{dI}. \tag{33}$$

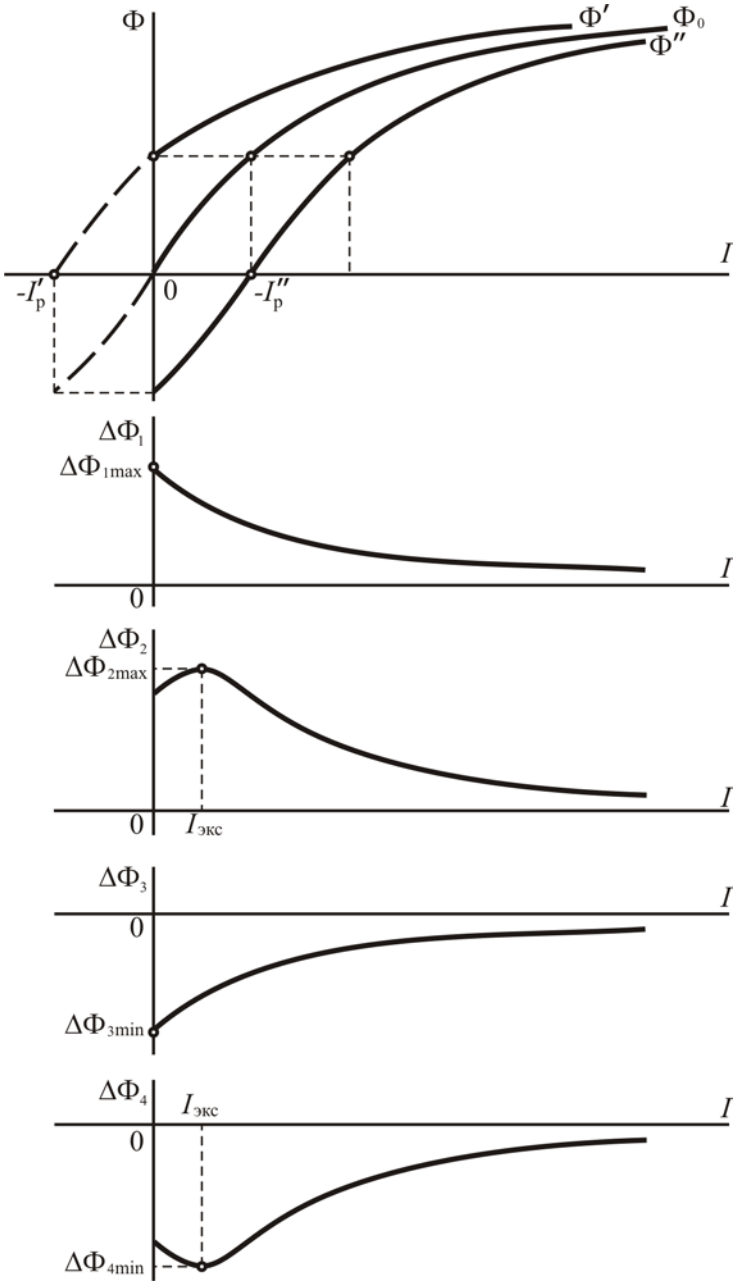

Рис. 3. **Зависимости разниц магнитных потоков от тока якоря**

Экстремумы функций $\Delta\Phi_1(I)$ и $\Delta\Phi_3(I)$ находятся вне границ отрезка изменения тока $I \subset (0;+\infty)$, обеспечивающего взаимного нагрузку электромашин. Максимальное значение $\Delta\Phi_1$ и минимальное $\Delta\Phi_3$ на отрезке $I > 0$ (режимы 1 и 3):

$$\Delta\Phi_{1\max} = \Delta\Phi_1(0); \tag{34}$$

$$\Delta\Phi_{3\min} = \Delta\Phi_3(0). \tag{35}$$

Для количественной оценки зависимости $\Delta\Phi(I)$ будем использовать ту же аналитическую зависимость $\Phi_o(I)$, что и в первом варианте. Тогда

$$\Delta\Phi(I) = A\left[\operatorname{arctg}B\left(I + I_{р1}\right) - \operatorname{arctg}B\left(I + I_{р2}\right)\right]. \tag{36}$$

Из условия (19), используя выражение (33), найдем точку экстремума функции $\Delta\Phi(I)$ в общем виде:

$$I_{экс} = -\frac{I_{р1} + I_{р2}}{2}; \tag{37}$$

$$\Delta\Phi_{экс} = A\left[\operatorname{arctg}\frac{B}{2}\left(I_{р1} - I_{р2}\right) - \operatorname{arctg}\frac{B}{2}\left(I_{р2} - I_{р1}\right)\right]. \tag{38}$$

Для режима 1 ($I_{р1} > 0$; $I_{р2} = 0$):

$$\Delta\Phi_{1maxp} = \Delta\Phi_1(0) = A \cdot \operatorname{arctg}\left(BI_{\ 1}\right). \tag{39}$$

Для режима 3 ($I_{р1} = 0$; $I_{р2} > 0$):

$$\Delta\Phi_{3minp} = \Delta\Phi_3(0) = -A \cdot \operatorname{arctg}\left(BI_{\ 2}\right). \tag{40}$$

Для режима 2 ($I_{р1} = 0$; $I_{р2} < 0$):

$$I_{экс} = -\frac{I_{р2}}{2}; \tag{41}$$

$$\Delta\Phi_{2\max} = 2A \cdot \operatorname{arctg}\left(B\frac{I_{р2}}{2}\right). \tag{42}$$

Для режима 4 ($I_{р1} < 0$; $I_{р2} = 0$):

$$I_{экс} = -\frac{I_{р1}}{2}; \tag{43}$$

$$\Delta\Phi_{4\min} = -2A \cdot \operatorname{arctg}\left(B\frac{I_{р1}}{2}\right). \tag{44}$$

Достаточный практический интерес представляет собой возможность определения значений коэффициентов $k_{вг}$ и $k_{вд}$ (вариант 1) или токов $I_{р1}$, $I_{р2}$ (вариант 2),

обеспечивающих необходимую небалансную электромагнитную мощность $\Delta P_{\text{эм}}$ или разницу потоков $\Delta\Phi$.

Решая уравнение (22) относительно $k_{\text{вг}}$ при условии $k_{\text{вд}}=1$ и относительно $k_{\text{вд}}$ при условии $k_{\text{вг}}=1$, получим:

$$k_{\text{вг}}\Big|_{k_{\text{вд}}=1}=\frac{BI+\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)}{BI\left[1-\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)BI\right]}; \tag{45}$$

$$k_{\text{вд}}\Big|_{k_{\text{вг}}=1}=\frac{BI-\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)}{BI\left[1+\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)BI\right]}. \tag{46}$$

Решая уравнение (35) относительно $I_{\text{р1}}$ при условии $I_{\text{р2}}=0$ и относительно $I_{\text{р2}}$ при условии $I_{\text{р1}}=0$, получим:

$$I_{\text{р1}}\Big|_{I_{\text{р2}}=0}=\frac{\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)\cdot\left(1+B^2I^2\right)}{B\left[1-BI\cdot\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)\right]}; \tag{47}$$

$$I_{\text{р2}}\Big|_{I_{\text{р1}}=0}=-\frac{\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)\cdot\left(1+B^2I^2\right)}{B\left[1+BI\cdot\text{tg}\left(\dfrac{\Delta\Phi}{A}\right)\right]}. \tag{48}$$

Использование полученных аналитических выражений позволит решить задачу выбора оптимальной структуры испытательной системы, обеспечивающей минимум затрат на выполнение программы приемосдаточных испытаний ТЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.

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. – 34-38.

3. *Архангельский Б.И.* Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин // Электричество. – 1950. №3. – С.30-32.

Надійшла