

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 магнітних потоків тягових електричних машин при їх випробуванні шляхом взаємного навантаження з використанням одного джерела електричної або механічної потужності.*

*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:

$$\sum \Delta P_{\text{э}} = P_{\text{эмг}} - P_{\text{эмд}}, \quad (1)$$

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

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

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

$$\sum \Delta P_{\text{хх}} = P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}}, \quad (2)$$

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

Электромагнитные мощности испытуемых электромашин:

$$P_{\text{эмг}} = C\Phi_{\Gamma} \omega_{\Gamma} I_{\Gamma}, \quad (3)$$

© Афанасов А. М., 2011

$$P_{эмд} = C\Phi_d \omega_d I_d, \quad (4)$$

где  $C$  – конструктивная постоянная однопольных испытуемых электромашин;  
 $\Phi_g, \Phi_d$  – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;  
 $\omega_g, \omega_d$  – скорости вращения валов генератора и двигателя соответственно;  
 $I_g, I_d$  – 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:

$$\omega_g = \omega_d = \omega; \quad (5)$$

$$I_g = I_d = I. \quad (6)$$

При этих условиях

$$\Delta P_{эм} = C\omega I \Delta \Phi, \quad (7)$$

где  $\Delta \hat{\Phi} = \hat{\Phi}_g - \hat{\Phi}_d$  – разница магнитных потоков генератора и двигателя.

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

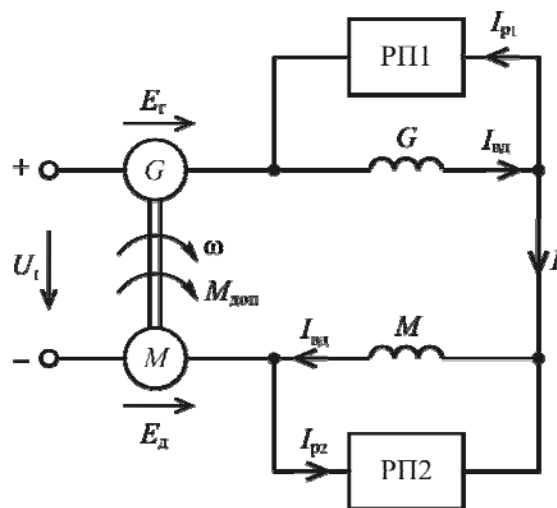


Рис. 1. Универсальная схема взаимного нагружения

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

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

$$I_{вг} = I + I_{р1}; \quad (8)$$

$$I_{вд} = I + I_{р2}. \quad (9)$$

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

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

При электрическом способе:  $M_{доп} = 0$ ;  $U_1 = var$ . При механическом способе:  $U_1 = 0$ ;  $M_{доп} = var$ . В принципе возможен и смешанный способ:  $M_{доп} = var$ ,  $U_1 = var$ , 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 испытываемых электромашин.

Режим 1:

$$\begin{cases} I_{р1} > 0; \\ I_{р2} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Режим 2:

$$\begin{cases} I_{р1} = 0; \\ I_{р2} < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Режим 3:

$$\begin{cases} I_{р1} = 0; \\ I_{р2} > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Режим 4:

$$\begin{cases} I_{р1} < 0; \\ I_{р2} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

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 испытываемых 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  $I_B$  к току якоря  $I$ . Назовём это отношение коэффициентом возбуждения  $k_B$ .

$$k_B = \frac{I_B}{I} = const. \quad (14)$$

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

Будем считать известной зависимость магнитного потока электромашинного последовательного возбуждения от тока якоря  $\Phi_o(I)$  при условии равенства тока возбуждения  $I_B$  току якоря  $I$  ( $k_B = 1$ ). Тогда в общем случае зависимость магнитного потока  $\Phi$  электромашин от тока якоря  $I$  для режимов, при которых  $k_B \neq 1$ , будет иметь вид:

$$\Phi(I) = \Phi_o(k_B \cdot I). \quad (15)$$

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

$$\Delta\Phi = \Phi_o(k_{вг} \cdot I) - \Phi_o(k_{вд} \cdot I). \quad (16)$$

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

$$k_{вг} = \frac{I_{вг}}{I}; \quad (17)$$

$$k_{вд} = \frac{I_{вд}}{I}. \quad (18)$$

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

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

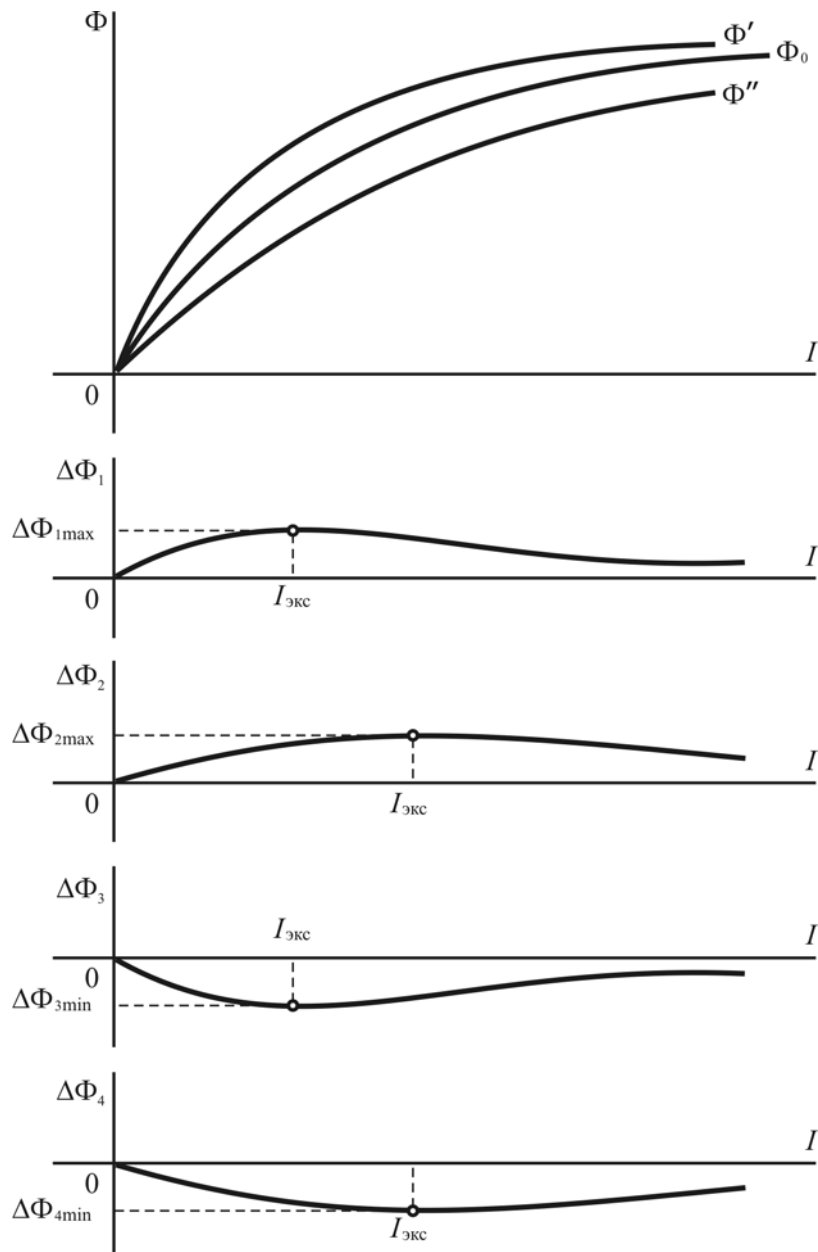


Рис. 2. Зависимости разниц магнитных потоков от тока якоря

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

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

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

$$\frac{d\Phi_o(k_{\text{вг}}I)}{dI} = \frac{d\Phi_o(k_{\text{вд}}I)}{dI}. \quad (20)$$

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

$$\Phi_o = A \cdot \text{arctg}(B \cdot I), \quad (21)$$

где  $A, B$  – постоянные коэффициенты.

С учётом (21) выражение (16) принимает вид:

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

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

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

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

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

$$I_{\text{экс}} = \frac{1}{\sqrt{k_{\text{вг}}}}; \quad (25)$$

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

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

$$I_{\text{экс}} = \frac{1}{\sqrt{k_{\text{вд}}}}; \quad (27)$$

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

Необходимо отметить, что при определённых параметрах испытуемых электромашин система взаимного нагружения с механическим способом компенсации

электрических потерь на интервале изменения тока ( $0; I_{\text{экс}}$ ) может быть электрически неустойчивой.

*Вариант 2.* Рассмотрим регулирование поля при постоянстве разницы тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  и тока якоря  $I$ . Эта разница представляет собой ток регулятора поля  $I_{\text{р}}$

$$I_{\text{р}} = I_{\text{в}} - I = \text{const} . \quad (29)$$

Для режима подпитки обмотки возбуждения  $I_{\text{р}} > 0$ , для режима отпитки –  $I_{\text{р}} < 0$ . При отключенном регуляторе поля  $I_{\text{р}} = 0$ .

Также как и в первом варианте будем считать известной зависимость  $\Phi_0(I)$ , соответствующую условию  $I_{\text{в}} = I$ .

В общем случае зависимость магнитного потока  $\Phi$  электромашин от тока якоря  $I$  для режимов, при которых  $I_{\text{р}} \neq 0$ , будет иметь вид

$$\Phi(I) = \Phi_0(I + I_{\text{р}}) . \quad (30)$$

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

$$\Delta\Phi = \Phi_0(I + I_{\text{р1}}) - \Phi_0(I + I_{\text{р2}}) . \quad (31)$$

На рис. 3 зависимости магнитного потока от тока якоря приведены в графическом виде. Кривая  $\Phi_0(I)$  соответствует режиму  $I_{\text{р}} = 0$  (регулятор отключен), кривая  $\Phi'(I)$  – режиму  $I_{\text{р}} > 0$  (подпитка), кривая  $\Phi''(I)$  – режиму  $I_{\text{р}} < 0$  (отпитка).

Кривые  $\Phi'(I)$  и  $\Phi''(I)$  представляют собой множество точек кривой  $\Phi_0(I)$ , смещённых влево и вправо соответственно на величину  $|I_{\text{р}}|$ .

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:

$$\frac{d\Delta\Phi}{dI} = 0 \quad (32)$$

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

$$\frac{d\Phi_0(I + I_{\text{р1}})}{dI} = \frac{d\Phi_0(I + I_{\text{р2}})}{dI} . \quad (33)$$

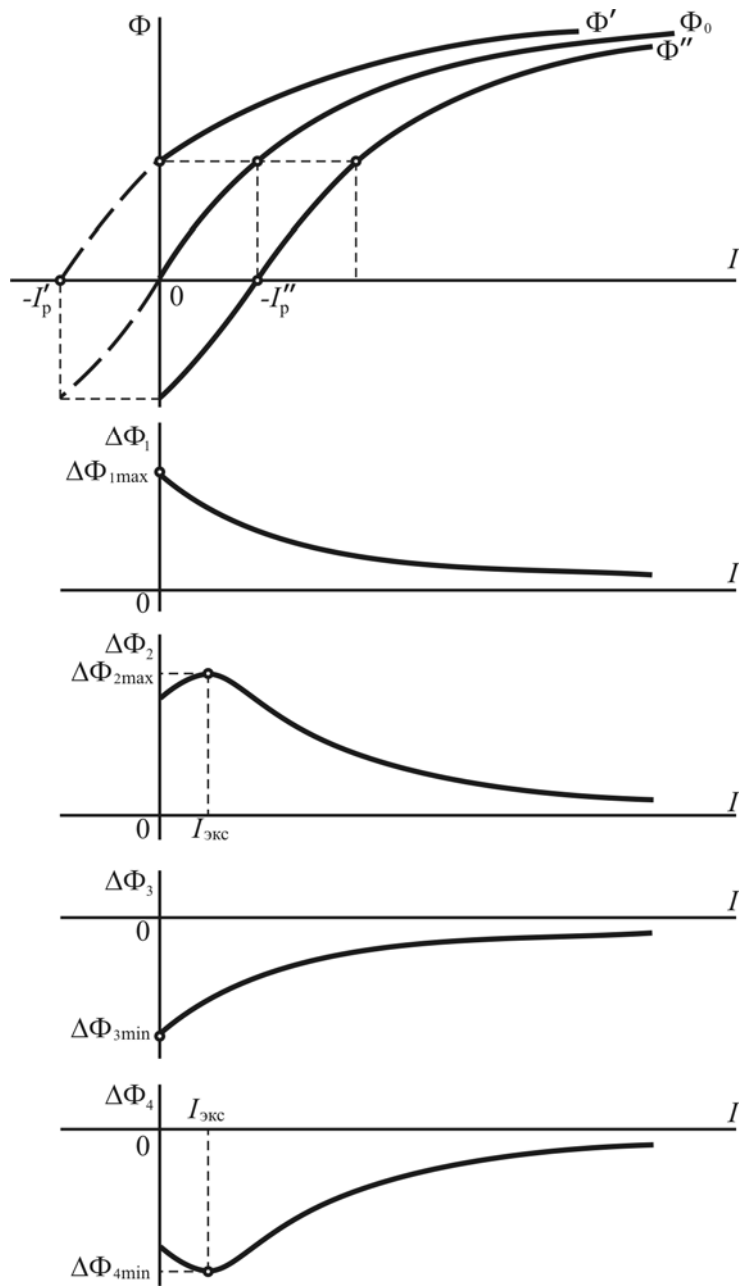


Рис. 3. Зависимости разниц магнитных потоков от тока якоря

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

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



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

Для количественной оценки зависимости  $\Delta\Phi(I)$  будем использовать ту же аналитическую зависимость  $\Phi_0(I)$ , что и в первом варианте. Тогда:

$$\Delta\Phi(I) = A \left[ \operatorname{arctg} B(I + I_{p1}) - \operatorname{arctg} B(I + I_{p2}) \right]. \quad (36)$$

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

$$I_{\text{экс}} = -\frac{I_{p1} + I_{p2}}{2}; \quad (37)$$

$$\Delta\Phi_{\text{экс}} = A \left[ \operatorname{arctg} \frac{B}{2}(I_{p1} - I_{p2}) - \operatorname{arctg} \frac{B}{2}(I_{p2} - I_{p1}) \right]. \quad (38)$$

Для режима 1 ( $I_{p1} > 0$ ;  $I_{p2} = 0$ ):

$$\Delta\Phi_{1\max} = \Delta\Phi_1(0) = A \cdot \operatorname{arctg}(BI_{p1}). \quad (39)$$

Для режима 3 ( $I_{p1} = 0$ ;  $I_{p2} > 0$ ):

$$\Delta\Phi_{3\min} = \Delta\Phi_3(0) = -A \cdot \operatorname{arctg}(BI_{p2}). \quad (40)$$

Для режима 2 ( $I_{p1} = 0$ ;  $I_{p2} < 0$ ):

$$I_{\text{экс}} = -\frac{I_{p2}}{2}; \quad (41)$$

$$\Delta\Phi_{2\max} = 2A \cdot \operatorname{arctg} \left( B \frac{I_{p2}}{2} \right). \quad (42)$$

Для режима 4 ( $I_{p1} < 0$ ;  $I_{p2} = 0$ ):

$$I_{\text{экс}} = -\frac{I_{p1}}{2}; \quad (43)$$

$$\Delta\Phi_{4\min} = -2A \cdot \operatorname{arctg} \left( B \frac{I_{p1}}{2} \right). \quad (44)$$

Достаточный практический интерес представляет собой возможность определения значений коэффициентов  $k_{\text{вг}}$  и  $k_{\text{вд}}$  (вариант 1) или токов  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  (вариант 2),

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

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

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

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

Решая уравнение (35) относительно  $I_{p1}$  при условии  $I_{p2} = 0$  и относительно  $I_{p2}$  при условии  $I_{p1} = 0$ , получим:

$$I_{p1} \Big|_{I_{p2} = 0} = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\Phi}{A}\right) \cdot (1 + B^2 I^2)}{B \left[1 - BI \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\Phi}{A}\right)\right]}; \quad (47)$$

$$I_{p2} \Big|_{I_{p1} = 0} = -\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\Phi}{A}\right) \cdot (1 + B^2 I^2)}{B \left[1 + BI \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\Phi}{A}\right)\right]}. \quad (48)$$

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. – С. 34-38.
3. *Архангельский Б.И.* Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин // Электричество. – 1950. №3. – С.30-32.