

Афанасов А. М. Моделирование электромеханических процессов в стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин // Наук.-техн. збір. «Гірничча електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 84. – С. 210-217. (ISSN 0201-7814).

УДК 621.313.001.4

А. М. АФАНАСОВ (ДИИТ)

(Украина, Днепрпетровск, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТЕНДЕ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

Приводиться модель стенда взаимной нагрузки тяговых электрических машин постоянного тока.

Приводиться модель стенду взаємного навантаження тягових електричних машин постійного струму.

It is brought a model over of stand of the mutual loading of hauling electric machines of direct current.

Схема стенда взаимной нагрузки изображена на рис 1. Она включает в себя обмотки испытуемого двигателя M_1 и генератора M_2 , источники напряжения ИН1 и ИН2. Источник ИН1 в схеме данной структуры обычно называют вольтдобавочной машиной, а источник ИН2 – линейным генератором.

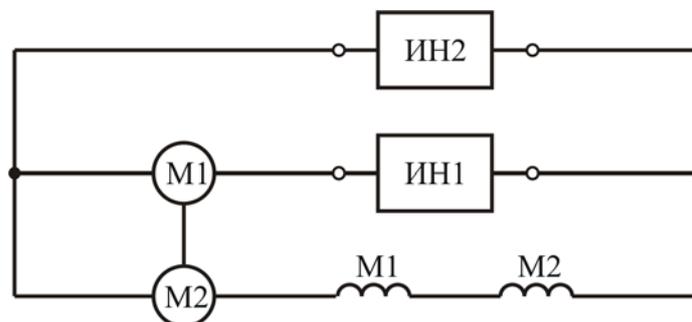


Рис 1. Схема стенда взаимной нагрузки

На рис. 2 приведена схема замещения стенда, которая включает в себя источники э.д.с. E_1 и E_2 , катушки индуктивности $L_1, L_2, L_3, L_{B1}, L_{B2}$, резисторы R_1, R_2, R_3 . К схеме подведены напряжения U_1, U_2 .

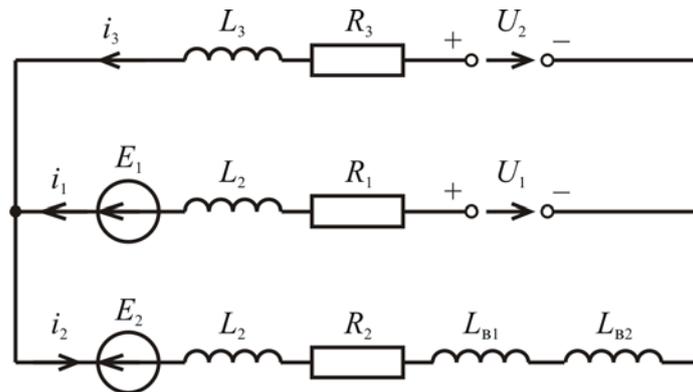


Рис 2. Схема замещения стенда взаимной нагрузки

E_1 и E_2 представляют собой э. д. с. якорей генератора M_1 и двигателя M_2 .

$$E_1 = C\Phi_1\omega; \quad (1)$$

$$E_2 = C\Phi_2\omega, \quad (2)$$

где C – конструктивная постоянная испытуемых электромашин;

Φ_1, Φ_2 – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

ω – угловая скорость якорей испытуемых электромашин.

L_1 и L_2 представляют собой суммарные индуктивности якорных цепей испытуемых электромашин, каждая из которых включает в себя обмотки якоря, дополнительные полюсов и компенсационные обмотки.

$L_{в1}$ и $L_{в2}$ – индуктивности обмоток возбуждения M_1 и M_2 соответственно.

R_1 представляет собой активное сопротивление якорной цепи генератора M_1 , а R_2 складывается из суммы активных сопротивлений якорной цепи двигателя M_2 и обмоток возбуждения обеих испытуемых электромашин M_1 и M_2 .

R_3 и L_3 – активное сопротивление и индуктивность соответственно демпфирующих элементов, которые необходимы при использовании в качестве источника ИН2 полупроводникового преобразователя или внутренние сопротивление и индуктивность электромашинного преобразователя.

Индуктивности якорных цепей L_1 и L_2 могут быть приняты постоянными, не зависящими от токов якорей электромашин.

Индуктивности $L_{в1}$ и $L_{в2}$ зависят от степени насыщенности магнитных цепей испытуемых электромашин, которая определяется величиной тока в цепи испытуемого электродвигателя M_2 .

Электромеханические процессы в стенде взаимной нагрузки будут описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 - i_2 + i_3 = 0; \\ i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + w_B \frac{d\Phi_1}{dt} + w_B \frac{d\Phi_2}{dt} = U_1 + E_1 - E_2; \\ -i_1 \cdot R_1 + i_3 \cdot R_3 - L_1 \frac{di_1}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} = U_2 - E_1 - U_1; \\ M_{эм1} + \Delta M_{маг1} + \Delta M_{мех1} + \Delta M_{маг2} + \Delta M_{мех2} + J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = M_{эм2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

$$i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + w_B \frac{d\Phi_1}{dt} + w_B \frac{d\Phi_2}{dt} = U_1 + E_1 - E_2; \quad (4)$$

$$-i_1 \cdot R_1 + i_3 \cdot R_3 - L_1 \frac{di_1}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} = U_2 - E_1 - U_1; \quad (5)$$

$$M_{эм1} + \Delta M_{маг1} + \Delta M_{мех1} + \Delta M_{маг2} + \Delta M_{мех2} + J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = M_{эм2}. \quad (6)$$

где i_1 – сила тока в ветви якоря генератора;

i_2 – сила тока в ветви якоря двигателя;

i_3 – сила тока в ветви источника ИН2;

$M_{эм1}$ и $M_{эм2}$ – электромагнитные моменты генератора и двигателя соответственно;

$J_{пр}$ – суммарный приведенный момент инерции якорей двигателя и генератора;

$\Delta M_{маг1}$ и $\Delta M_{мех1}$ – моменты сопротивления на валу генератора, обусловленные магнитными и механическими потерями соответственно;

$\Delta M_{маг2}$ и $\Delta M_{мех2}$ – моменты сопротивления на валу двигателя, обусловленные магнитными и механическими потерями соответственно;

w_B – число витков всех обмоток возбуждения одной электромашины;

t – текущее время.

Электромагнитные моменты генератора и двигателя:

$$M_{эм1} = C \cdot \Phi_1 \cdot i_1; \quad (7)$$

$$M_{эм2} = C \cdot \Phi_2 \cdot i_2. \quad (8)$$

Выражения (3)-(6) системы представляют собой уравнения динамического равновесия электрической и механической частей испытательного стенда.

Э. д. с. самоиндукции, наводимые, в якорных цепях испытуемых электромашин определяются в уравнениях (4) и (5) как величины, пропорциональные производной тока по времени. Э. д. с. самоиндукции, наводимые в обмотках возбуждения, выражаются в уравнении (4) в виде величин, пропорциональных производным магнитных потоков электромашин, что обусловлено нелинейностью их магнитных характеристик.

Магнитный поток каждой из испытуемых электромашин может быть связан с током i_2 соотношением []

$$F(\Phi) = i_2 w_{B1} - K_B \Phi \frac{d\Phi}{dt}, \quad (9)$$

где $F(\Phi)$ – м. д. с. намагничивания в функции от магнитного потока (функция, обратная магнитной характеристике);

w_{B1} – число витков одной обмотки возбуждения;

K_B – коэффициент вихревых токов.

Функция $F(\Phi)$ для каждой из испытуемых электромашин будет соответствовать индивидуальной магнитной характеристике $F(\Phi)$, которая может отклоняться от типовой на $\pm 3\%$ []. Магнитный поток по уравнению (9) может быть выражен в виде

$$\Phi = f_1 \left(i_2 w_{B1} - K_B \Phi \frac{d\Phi}{dt} \right), \quad (10)$$

где f_1 – функция, описывающая магнитную характеристику $\Phi(F)$.

В операторной форме эта же зависимость будет выглядеть

$$\Phi(p) = f_1 \left(i_2(p) w_{B1} - K_B p \Phi^2 \right). \quad (11)$$

Моделирование взаимосвязи магнитного потока Φ и тока возбуждения i_2 по уравнению (9) может быть реализовано по структурной схеме, представленной на рис. 3.

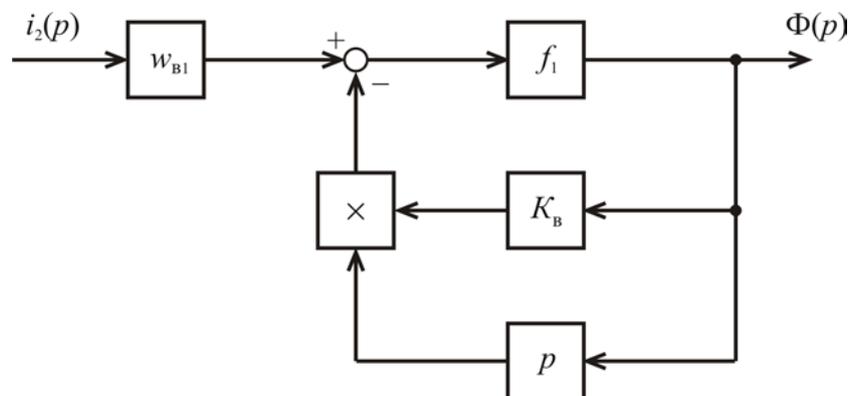


Рис.3. Структурная схема модели $\Phi(i_2)$

Моменты сопротивления на валах испытуемых электромашин, обусловленные магнитными потерями, могут быть определены в виде [3]:

$$\Delta M_{\text{маг1}} = f_2(\omega) \cdot \Phi_1^2 = (a \cdot \omega + b) \cdot \Phi_1^2; \quad (12)$$

$$\Delta M_{\text{маг2}} = f_2(\omega) \cdot \Phi_2^2 = (a \cdot \omega + b) \cdot \Phi_2^2, \quad (13)$$

где a и b – коэффициенты, постоянные для данного типа электромашин.

Моменты сопротивления, обусловленные механическими потерями, в каждой из испытуемых машин являются функциями угловой скорости ω и могут отличаться друг от друга. Для упрощения моделирования их можно принять равными друг другу.

$$\Delta M_{\text{мех1}} = \Delta M_{\text{мех2}} = f_3(\omega) = c \cdot \omega + d, \quad (14)$$

где c и d – коэффициенты, постоянные для данного типа электромашин.

Структурная схема модели стенда представлена на рис 4. Данная схема соответствует системе уравнений (3)-(6), которая при записи в операторной форме принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1(p) - i_2(p) + i_3(p) = 0; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1(p)[R_1 + L_1 p] + i_2(p)[R_2 + L_2 p] + w_B p [\Phi_1(p) + \Phi_2(p)] = \\ = U_1(p) + E_1(p) - E_2(p); \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -i_1(p)[R_1 + L_1 p] + i_3(p)[R_3 + L_3 p] = U_2(p) - E_1(p) - U_1(p); \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{эм1}}(p) + M_{\text{маг1}}(p) + M_{\text{мех1}}(p) + M_{\text{маг2}}(p) + M_{\text{мех2}}(p) + \\ + J_{\text{пр}} p \omega(p) = M_{\text{эм2}}(p). \end{array} \right. \quad (18)$$

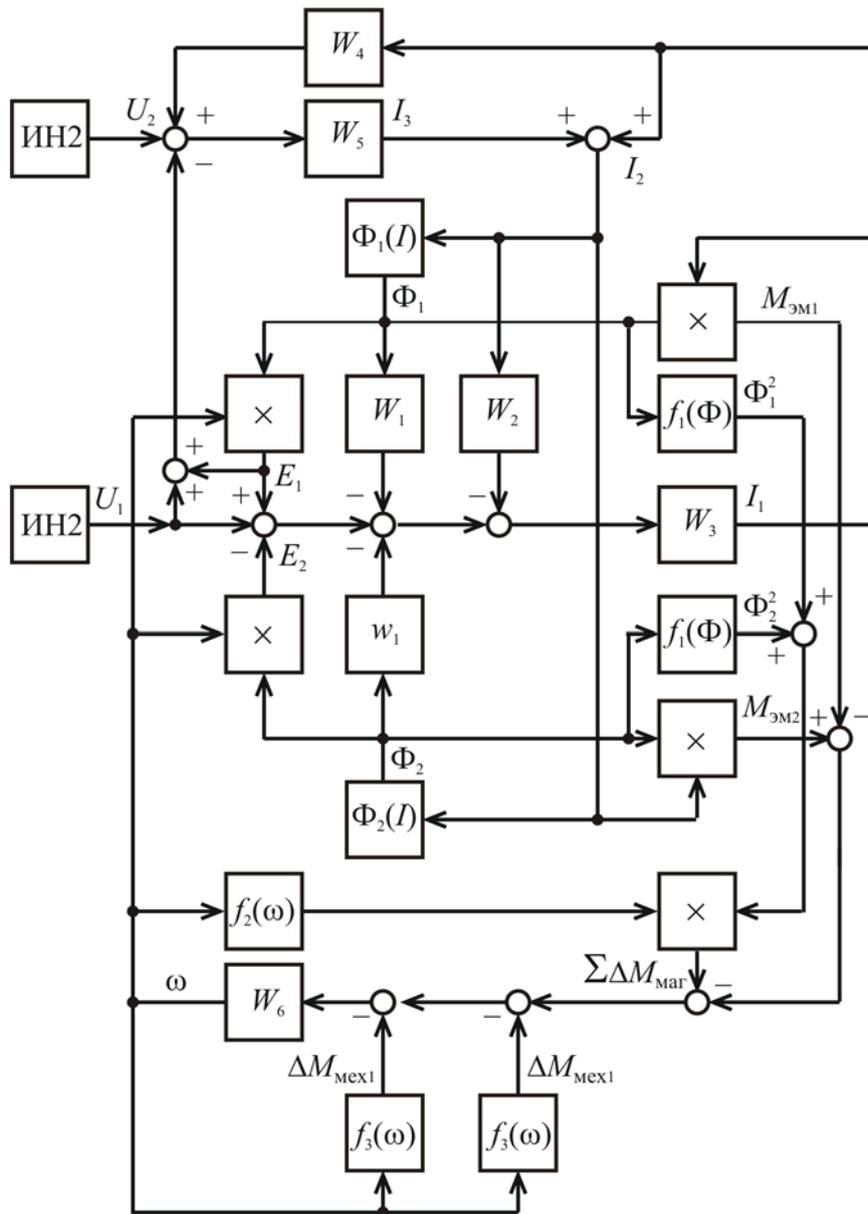


Рис. 4. Структурная схема модели стенда

Передаточные функции звеньев структурной схемы модели будут иметь вид:

$$W_1(p) = w_B p; \quad (19)$$

$$W_2(p) = R_2 + L_2 p; \quad (20)$$

$$W_3(p) = \frac{1}{R_1 + L_1 p}; \quad (21)$$

$$W_4(p) = R_1 + L_1 p \quad (22)$$

$$W_5(p) = \frac{1}{R_3 + L_3 p}; \quad (23)$$

$$W_6(p) = \frac{1}{J_{\text{пр}} \cdot p}; \quad (24)$$

$$f_1(\Phi) = \Phi^2; \quad (25)$$

$$f_2(\omega) = a \cdot \omega + b; \quad (26)$$

$$f_3(\omega) = c \cdot \omega + d. \quad (27)$$

Характеристики $\Phi_1(i_2)$ и $\Phi_2(i_2)$ являются динамическими и моделируются в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 3.

В статическом режиме работа станда будет описываться системой обыкновенных уравнений:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 + i_3 = 0; & (28) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2 = U_1 + E_1 - E_2; & (29) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -i_1 \cdot R_1 + i_3 \cdot R_3 = U_2 - E_1 - U_1; & (30) \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{эм1} + \sum \Delta M = M_{эм2}. & (31) \end{cases}$$

где $\sum \Delta M$ – суммарный момент сопротивления.

$$\sum \Delta M = \Delta M_{\text{маг1}} + \Delta M_{\text{мех1}} + \Delta M_{\text{маг2}} + \Delta M_{\text{мех2}}. \quad (32)$$

В результате решения системы из уравнений (28)-(30) могут быть получены выражения, связывающие электрические параметры схемы взаимной нагрузки в статическом режиме:

$$i_1 = \frac{R_2 \cdot (U_1 + E_1 - U_2) - R_3 \cdot (U_1 + E_1 - E_2)}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}; \quad (33)$$

$$i_2 = \frac{R_1 \cdot (U_2 - E_2) + R_2 \cdot (U_2 - U_1 - E_1)}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}; \quad (34)$$

$$i_3 = \frac{R_1 \cdot (U_2 - E_2) + R_3 \cdot (U_1 + E_1 - E_2)}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}. \quad (35)$$