

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ВХОДНЫХ
ПАРАМЕТРОВ НА ВЫХОДНЫЕ ДЛЯ МАШИН
ПОСТОЯННОГО ТОКА МОЩНОСТЬЮ 0,4 — 30 кВт**

А. П. МУРАВЛЕВ, А. Я. ЦИРУЛИК

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Важнейшей задачей современного технического прогресса является повышение качества изделий, в том числе и электрических машин. Только тщательная конструкторско-технологическая разработка при проектировании позволяет эффективно усовершенствовать электрическую машину. Методы инженерного расчета электрических машин постоянного тока, разработанные в настоящее время, основаны на предположении, что все параметры машины строго соответствуют расчетным, а такие величины, как удельное сопротивление, длина витка, диаметр провода и другие, имеют неизменные значения, определяемые по усредненным характеристикам. В действительности все величины имеют некоторый разброс, т. е. являются случайными величинами.

Качество электрических машин характеризуется точностью, т. е. степенью соответствия параметров изготовленной машины расчетным параметрам.

В настоящее время к машинам постоянного тока предъявляются повышенные требования по точности как геометрических размеров, так и технических характеристик.

Целью настоящей работы является определение влияния входных параметров на выходные для машин постоянного тока. Выходными параметрами являются параметры, характеризующие работу машины. При постоянной мощности на валу двигателя в данном случае выходными параметрами будут ток якоря, к. п. д. и скорость вращения. Входными параметрами являются основные и локальные размеры, а также характеристики применяемых материалов (геометрические размеры, диаметр провода, удельное сопротивление меди и т. п.).

Для электрической машины входные и выходные параметры в самом общем виде могут быть связаны следующим выражением:

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m), \quad (1)$$

где

y_i — выходной параметр,

x_i — входной параметр.

Из уравнения (1) можно получить выражение для относительной погрешности [1]

$$\frac{\Delta y_i}{y_i} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)}{\partial x_j} \frac{x_j}{f_i(x_1, x_2, \dots, x_m)} \frac{\Delta x_j}{x_j}. \quad (2)$$

Выражение (2), устанавливающее зависимость между погрешностями входных и выходного параметров, в теории точности называют уравнением погрешности. Коэффициенты

$$C_{ji} = \frac{\partial f_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{f_i(x_1, x_2, \dots, x_m)} \quad (3)$$

называются коэффициентами влияния параметров j на выходную характеристику i .

На основании уравнения (2) можно сделать вывод, что снижение рассеивания выходного параметра может быть достигнуто двумя основными способами:

1. Уменьшением разброса входных параметров.
2. Уменьшением коэффициентов влияния.

Наибольшую точность можно получить при одновременном использовании обоих способов.

Отклонения выходных параметров машины описываются рядом уравнений погрешности, число которых определяется числом выходных параметров. Эти уравнения являются исходными для расчета допусков и анализа производственных погрешностей.

По уравнениям можно производить расчет отклонений выходного параметра по заданным отклонениям на входные параметры (прямая задача теории точности) и расчет допустимых отклонений входных параметров по заданному допуску на выходной (обратная задача теории точности).

Для вывода коэффициентов влияния на ток якоря используется формула подводимой мощности [2]

$$P_1 = P_2 + P_v + P_m + P_{шк} + P_{ст} + P_{доб}, \quad (4)$$

из которой выделяются величины, зависящие от I_a ,

$$P' = P_1 - P_v = I_a U = I_a^2 R_a + 2 \Delta U_{ш} I_a + p''. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получается выражение для тока якоря

$$I_a = \frac{U - 2 \Delta U_{ш}}{2 R_a} - \sqrt{\left(\frac{U - 2 \Delta U_{ш}}{2 R_a} \right)^2 - \frac{p''}{R_a}}. \quad (6)$$

На основании уравнений (6) и (3) для C_{ji} находим:

$$C_{R_a I_a} = -1 + \frac{2 R_a p''}{\sqrt{a} (1 - \sqrt{a}) (U - 2 \Delta U_{ш})^2}; \quad (7)$$

$$C_{p'' I_a} = \frac{2 R_a p''}{\sqrt{a} (1 - \sqrt{a}) (U - 2 \Delta U_{ш})^2}; \quad (8)$$

$$C_{U I_a} = \frac{U}{U - 2 \Delta U_{ш}} - \frac{4 R_a p'' U}{\sqrt{a} (1 - \sqrt{a}) (U - 2 \Delta U_{ш})^3}; \quad (9)$$

$$C_{\Delta U_{ш} I_a} = -\frac{2 \Delta U_{ш}}{U - 2 \Delta U_{ш}} + \frac{8 R_a p'' \Delta U_{ш}}{\sqrt{a} (1 - \sqrt{a}) (U - 2 \Delta U_{ш})^3}, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad a = 1 - \frac{4 p'' R_a}{(U - 2 \Delta U_{ш})^2}.$$

Коэффициенты влияния на скорость вращения получаются на основании выражения:

$$n = \frac{U - I_a R_a - 2 \Delta U_{ш}}{C_e \Phi}. \quad (11)$$

$$C_{I_a n} = -\frac{R_a I_a}{U - I_a R_a - 2 \Delta U_{ш}}; \quad (12)$$

$$C_{U_n} = \frac{U}{U - I_a R_a - 2\Delta U_{ш}}; \quad (13)$$

$$C_{\Delta U_{ш}n} = - \frac{2\Delta U_{ш}}{U - I_a R_a - 2\Delta U_{ш}}; \quad (14)$$

$$C_{R_a n} = - \frac{I_a R_a}{U - I_a R_a - 2\Delta U_{ш}}; \quad (15)$$

$$C_{\Phi n} = -1.$$

Выражение для к. п. д. выводится из уравнения (4)

$$\eta = \frac{P_2}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}. \quad (16)$$

Коэффициенты влияния на к. п. д. имеют вид:

$$C_{I_a \eta} = - \frac{(2I_a R_a + 2\Delta U_{ш}) I_a}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}; \quad (17)$$

$$C_{R_a \eta} = - \frac{I_a^2 R_a}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}; \quad (18)$$

$$C_{\Delta U_{ш} \eta} = - \frac{2I_a \Delta U_{ш}}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}; \quad (19)$$

$$C_{U \eta} = - \frac{2 \frac{U^2}{r_{ш}}}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}; \quad (20)$$

$$C_{r_{ш} \eta} = - \frac{\frac{U^2}{r_{ш}}}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}; \quad (21)$$

$$C_{p'' \eta} = - \frac{p''}{I_a^2 R_a + 2\Delta U_{ш} I_a + \frac{U^2}{r_{ш}} + p''}. \quad (22)$$

Для основных типоразмеров машин постоянного тока мощностью 0,4—30 кВт были вычислены коэффициенты влияния. Численные значения коэффициентов влияния приведены в табл. 1.

Таблица 1

$C_{R_a I_a}$	$C_{U I_a}$	$C_{\Delta U_{ш} I_a}$	$C_{p'' I_a}$	C_{U_n}	$C_{I_a n} = C_{R_a n}$	$C_{\Delta U_{ш} n}$
0,022 ÷ 0,300	—2,295 —1,043	0,0038 —0,06768	1,022 ÷ 1,3	1,034 ÷ 1,245	—0,0261 ÷ —0,260	—0,0094 ÷ —0,0226
$C_{I_a \eta}$	$C_{R_a \eta}$	$C_{U \eta}$	$C_{r_{ш} \eta}$	$C_{p'' \eta}$	$C_{\Delta U_{ш} \eta}$	$C_{\Phi n}$
—0,056 ÷ —0,324	—0,0236 ÷ —0,1585	—0,0344 ÷ —0,374	0,0232 ÷ 0,187	—0,680 ÷ —0,948	—0,007377 ÷ —0,0241	—1

На основании анализа полученных результатов было принято решение пренебречь коэффициентами влияния $C_{\Delta U_{\text{щ}} I_a}$ и $C_{\Delta U_{\text{щ}} \Phi}$ ввиду их малости, а также считать, что дисперсия питающего напряжения равна нулю, так как при снятии номинальных характеристик напряжения на машине должно быть номинальным.

В полученных выше коэффициентах влияния такие величины, как R_a , $r_{\text{ш}}$, p'' и Φ , являются промежуточными величинами, зависящими от входных параметров (удельное сопротивление, диаметр провода, средняя длина витка, геометрические размеры магнитной цепи и т. п.).

Рассмотрим дисперсию сопротивления якорной цепи

$$R_a = r_a + r_d + r_c. \quad (23)$$

Из уравнения (23) получаем

$$\sigma^2_{R_{a0}} = C^2_{r_a R_a} \sigma^2_{(r_a)_0} + C^2_{r_d R_a} \sigma^2_{(r_d)_0} + C^2_{r_c R_a} \sigma^2_{(r_c)_0}, \quad (24)$$

где

$$C_{r_a R_a} = \frac{r_a}{R_a}; \quad C_{r_d R_a} = \frac{r_d}{R_a}; \quad C_{r_c R_a} = \frac{r_c}{R_a}.$$

Расчеты показали, что значения коэффициентов влияния на сопротивление для всех типоразмеров находятся в пределах, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

$C_{r_a R_a}$	$0,594 \div 0,805$
$C_{r_d R_a}$	$0,136 \div 0,377$
$C_{r_c R_a}$	$0,0117 \div 0,139$

Из табл. 2 видно, что коэффициентами влияния $C_{r_c R_a}$ можно пренебречь вследствие их малой величины.

В свою очередь, дисперсии сопротивлений обмоток якоря и дополнительных полюсов зависят от определенных величин. В общем виде выражение для сопротивления имеет вид

$$r = \rho \frac{4 l_{\text{в.ср}} w}{\pi d^2 (2a)^2}. \quad (25)$$

На основании выражения (25) коэффициенты влияния на сопротивление получаются постоянными и численно равны

$$C_{\rho r} = 1; \quad C_{l_{\text{в.ср}} r} = 1; \quad C_{dr} = -2; \quad C_{wr} = 1.$$

Тогда коэффициенты влияния входных параметров (ρ , $l_{\text{в.ср}}$, d , w) на ток I_a будут равны

$$C_{\rho I_a} = C_{r I_a} \cdot C_{\rho r}; \quad C_{l_{\text{в.ср}} I_a} = C_{r I_a} \cdot C_{l_{\text{в.ср}} r}; \\ C_{d I_a} = C_{r I_a} \cdot C_{dr}; \quad C_{w I_a} = C_{r I_a} \cdot C_{wr}.$$

Выражение для магнитного потока имеет вид

$$\Phi = \frac{F_{\text{рез}}}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i \cdot S_i}}. \quad (26)$$

Дисперсия потока из этого выражения

$$\sigma^2_{\Phi_0} = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 (\sigma^2_{l_{i0}} + \sigma^2_{a_i} + \sigma^2_{b_{i0}} + \sigma^2_{\mu_{i0}}) + \sigma^2_{(F_{рез})_0}, \quad (27)$$

где

$$\alpha_i = \frac{l_i}{\mu_i a_i b_i} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i S_i}} \quad \text{и}$$

представляет собой относительную долю магнитного сопротивления данного участка магнитной системы.

В магнитной системе выделяется шесть участков магнитной цепи: станина, ярмо якоря, зубцы якоря, воздушный зазор, сердечник полюса, зазор между сердечником полюса и станиной.

В выражениях (27) a , b , l — геометрические размеры каждого участка, μ — магнитная проницаемость.

Представленные формулы для расчета коэффициентов влияния входных параметров на выходные для машин постоянного тока мощностью 0,4—30 кВт позволяют анализировать влияние различных технологических факторов на характеристики машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Исаев. Допуски на характеристики электрических локомотивов. М., Трансжелдориздат, 1958.
2. И. Н. Радинович, И. Г. Шубов. Проектирование электрических машин постоянного тока. Л., «Энергия», 1967.