



УДК 53.088

**РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ
УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВЕБЕР-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Лобов И.Р., Бранчукова Д.А., Перегудова О.О.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
г. Новочеркасск

В данной статье рассматривается расчет погрешности канала измерения индукции устройства измерения вебер-амперной характеристики электромагнитов постоянного тока. При изготовлении измерительных приборов, параметры которых лежат в пределах заданных допусков, погрешность нуля (аддитивная погрешность) и чувствительности (мультипликативная) являются величинами случайными и имеют законы распределения, близкие к нормальным

Ключевые слова: электромагнит, диагностика, контроль, вебер-амперная характеристика

**CALCULATION OF THE ERROR OF THE CHANNEL FOR MEASURING
THE INDUCTION OF THE DEVICE FOR MEASURING THE
WEBER-AMPERE CHARACTERISTIC OF DC ELECTROMAGNETS**

Lobov I.R., Branchukova D.A., Peregudova O.O.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

This article discusses the calculation of the error of the channel for measuring the induction of the device for measuring the weber-ampere characteristics of DC electromagnets. In the manufacture of measuring devices, the parameters of which lie within the specified tolerances, the error of zero (additive error) and sensitivity (multiplicative) are random quantities and have distribution laws close to normal

Keywords: electromagnet, diagnostics, control, weber-ampere characteristic

В этом случае наиболее точным является геометрическое суммирование погрешностей, при котором результирующая погрешность средства измерения равна:

$$\gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \gamma_i^2}.$$

К аддитивным погрешностям операционных усилителей относится погрешность, вызванная напряжением смещения $e_{см}$ и входными токами Δi операционного усилителя:

$$\delta_{см} = \frac{e_{см} + \Delta i \cdot R'}{U_{вх ном}} \cdot 100\% ,$$

где R' - входное сопротивление усилителя.

Для предварительного усилителя (DA1):
на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{см1} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0.3 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3}{9.4 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0.3617\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0.2$ Тл)

$$\delta_{см1} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0.3 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3}{9.4 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 0.0362\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)



$$\delta_{cm1} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3}{0,94} \cdot 100\% = 0,0036\% .$$

Для ФНЧ (DA2):

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{cm2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 16 \cdot 10^3}{23,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0,0374\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{cm2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 16 \cdot 10^3}{23,5 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 0,0037\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{cm2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3}{2,35} \cdot 100\% = 0,0004\% .$$

Для масштабирующего усилителя (DA6):

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{cm3} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3}{9,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0,0457\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{cm3} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3}{9,4 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 0,0046\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{cm3} = \frac{4 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3}{0,94} \cdot 100\% = 0,0005\% .$$

Суммарная аддитивная погрешность всего каскада усиления на операционных усилителях *OP177A*, включающего предварительный усилитель, ФНЧ и масштабирующий усилитель, равна

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{cm\Sigma} = \sqrt{(0,3617)^2 + (0,0374)^2 + (0,0457)^2} = 0,3665\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{cm\Sigma} = \sqrt{(0,0362)^2 + (0,0037)^2 + (0,0046)^2} = 0,0367\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{cm\Sigma} = \sqrt{(0,0036)^2 + (0,0004)^2 + (0,0005)^2} = 0,0037\% .$$

Относительная мультипликативная погрешность усилителей определяется нелинейностью резисторов, включенных в обратную связь. Выбраны прецизионные резисторы С2-29В с погрешностью 0,05%.

Для предварительного усилителя

$$\gamma_{\kappa1} = \gamma_{R3} + \gamma_{R5} = 0,05 + 0,05 = 0,1\% .$$

Для неинвертирующего усилителя ФНЧ:

$$\gamma_{\kappa2} = \frac{R12}{R12 + R19} (\gamma_{R12} + \gamma_{R19}) = \frac{10}{10 + 10} (0,05 + 0,05) = 0,05\% .$$



Для масштабирующего усилителя:

$$\gamma_{\kappa 3} = \gamma_{R22} + \gamma_{R25} = 0,05 + 0,05 = 0,1\%.$$

Так как погрешности резисторов $R25 - R28$ одинаковы, то достаточно считать погрешность только от одного резистора, в данном случае $R25$.

$$\gamma_{\kappa \Sigma} = \sqrt{(0,1)^2 + (0,05)^2 + (0,1)^2} = 0,15\%.$$

Дополнительная погрешность обусловлена в основном влиянием изменения температуры окружающей среды. По заданию $\Delta t = 20^\circ \text{C}$.

При изменении температуры внешней среды дополнительная погрешность усилителя может быть определена:

$$\delta_t = \frac{TKe_{cm}}{U_{\text{вх ном}}} \cdot \Delta t \cdot 100\%.$$

Для предварительного усилителя:

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{t1} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{9,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 20 \cdot 100\% = 0,0064\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{t1} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{9,4 \cdot 10^{-2}} \cdot 20 \cdot 100\% = 6,4 \cdot 10^{-4}\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{t1} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{0,94} \cdot 20 \cdot 100\% = 6,4 \cdot 10^{-5}\% .$$

Для ФНЧ:

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{t2} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{23,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 20 \cdot 100\% = 0,0026\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{t2} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{23,5 \cdot 10^{-2}} \cdot 20 \cdot 100\% = 2,6 \cdot 10^{-4}\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{t2} = \frac{0,03 \cdot 10^{-6}}{2,35} \cdot 20 \cdot 100\% = 2,6 \cdot 10^{-5}\% .$$

Для масштабирующего усилителя:

на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)

$$\delta_{t3} = \delta_{t1} = 0,0064\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B = 0,2$ Тл)

$$\delta_{t3} = \delta_{t1} = 6,4 \cdot 10^{-4}\% ,$$

на третьем пределе измерения (при $B_{max} = 2$ Тл)

$$\delta_{t3} = \delta_{t1} = 6,4 \cdot 10^{-5}\% .$$

Суммарная дополнительная погрешность операционных усилителей равна:
на первом пределе измерения (при $B = 20$ мТл)



$$\delta_{t\Sigma} = \sqrt{(0,0064)^2 + (0,0026)^2 + (0,0064)^2} = 0,0094\% ,$$

на втором пределе измерения (при $B=0,2$ Тл)

$$\delta_{cm\Sigma} = \sqrt{(6,4 \cdot 10^{-4})^2 + (2,6 \cdot 10^{-4})^2 + (6,4 \cdot 10^{-4})^2} = 0,0009\% .$$

На третьем пределе измерения (при $B_{max}=2$ Тл)

$$\delta_{cm\Sigma} = \sqrt{(6,4 \cdot 10^{-5})^2 + (2,6 \cdot 10^{-5})^2 + (6,4 \cdot 10^{-5})^2} = 9,4 \cdot 10^{-5}\% .$$

Рассчитаем дополнительную погрешность от резисторов в обратных связях усилителей.

$$\gamma_{tR} = TКС \cdot \Delta t \cdot 100\% ,$$

где ТКС – температурный коэффициент сопротивления, для С2-29В ТКС=50·10⁻⁶ Ом/°С

$$\gamma_{tR1} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 100\% = 0,1\% ,$$

$$\gamma_{tR\Sigma} = \gamma_{tR1} \cdot \sqrt{m} ,$$

где m – число однотипных резисторов.

$$\gamma_{tR\Sigma} = 0,1 \cdot \sqrt{9} = 0,3\% .$$

Расчет погрешности блока усиления с переменным коэффициентом усиления.

Возникновение погрешности коэффициента усиления БУсПКУ связано с тем, что цифровой коммутатор в замкнутом состоянии имеет неидеальное сопротивление (не равное нулю), что приводит к изменению коэффициента усиления.

Сопротивление R_k контакта коммутатора 590КН4 в замкнутом состоянии 75 Ом. То есть для первого предела измерений коэффициент будет равен:

$$k_{o1} = \frac{R28 + R_k}{R22} = \frac{5000 + 0,075}{10} = 500,0075 ,$$

для второго предела:

$$k_{o2} = \frac{R27 + R_k}{R22} = \frac{500 + 0,075}{10} = 50,0075 ,$$

для третьего предела:

$$k_{o3} = \frac{R26 + R_k}{R22} = \frac{50 + 0,075}{10} = 5,0075 .$$

Погрешность рассчитаем по формуле:

$$\gamma_{BY} = \frac{k_d - k}{k} \cdot 100\% .$$

$$\gamma_{1BY} = \frac{k_{d1} - k_1}{k_1} \cdot 100\% = \frac{500,0075 - 500}{500} \cdot 100\% = 0,0015\% ,$$

$$\gamma_{2BY} = \frac{k_{d2} - k_2}{k_2} \cdot 100\% = \frac{50,0075 - 50}{50} \cdot 100\% = 0,015\% ,$$

$$\gamma_{3BY} = \frac{k_{d3} - k_3}{k_3} \cdot 100\% = \frac{5,0075 - 5}{5} \cdot 100\% = 0,15\% .$$

Как видно, величина погрешности убывает с ростом коэффициента усиления.