



УДК621.317.791

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИНДУКТИВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*И.О. Блажко, blazhko1999@mail.ru, Е.С. Гульматова, А.Ю. Полухин,
Е.Н. Чернышова*

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

В данной статье рассматривается методика быстрого получения большинства параметров системы индуктивного измерительного преобразователя. Для более простого получения параметров системы индуктивного измерительного преобразователя, таких как количество витков на катушке, проводимость, сопротивление, минимальный и максимально допустимые зазоры, ток, напряжение. Все эти параметры можно использовать на разных "уровнях" расчета. Для получения параметров расчета реализована программа, созданная на базе языка программирования JavaScript и графическим интерфейсом реализованным на языке разметки HTML с таблицей каскадных стилей CSS.

Ключевые слова: объектно-ориентированный язык моделирования, электромагнитные преобразователи, технологии HTML разметки, расчет электромагнитного преобразователя, магнитное сопротивление, электрическое сопротивление, плотность тока в электромагнитном преобразователе.

CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC SYSTEM OF THE INDUCTIVE MEASURING TRANSMITTER

*I.O. Blazhko, blazhko1999@mail.ru, Y.S. Gulmatova, A.Y. Polukhin,
Y.N. Chernyshova*

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

This article discusses the method of quickly obtaining most of the parameters of an inductive measuring transducer system. To more easily obtain the parameters of the inductive measuring transducer system, such as the number of turns on the coil, conductivity, resistance, minimum and maximum allowable gaps, current, voltage. All these parameters can be used at different "levels" of calculation. To obtain the calculation parameters, a program was created based on the JavaScript programming language and a graphical interface implemented in the HTML markup language with a CSS cascading style sheet.

Keywords: object-oriented modeling language, electromagnetic transducers, HTML markup technologies, electromagnetic transducer calculation, magnetic resistance, electrical resistance, current density in the electromagnetic transducer.

Индуктивный датчик – бесконтактный датчик, предназначенный для контроля положения объектов из металла (к другим материалам не чувствителен).

Индуктивные датчики приближения применяются широко в промышленной автоматике, чтобы определить положение той или иной части механизма.

Сигнал с выхода датчика может поступать на вход контроллера, преобразователя частоты, реле, контактора или другого исполнительного устройства. Единственное условие – соответствие по току и напряжению.

Расчет электромагнитной системы индуктивного измерительного преобразователя

На рис 1 приведена схема рассчитываемой электромагнитной системы индуктивного измерительного преобразователя с П-образным сердечником [1, 2]



(верхняя часть катушки симметрична относительно части III магнитопровода и не показана). На этой схеме: I (подвижная часть – якорь), II, III, IV (неподвижная часть) – участки симметричного магнитопровода; δ – величина зазора; a, b, c, f, h, t – габаритные размеры; λ – толщина каркаса катушки; $E/2$ – величина зазора между каркасом и магнитопроводом.

Исходными данными являются: габаритные размеры $a=f=t=b$, c , h ; величина изменения зазора $\pm\Delta\delta$; чувствительность к изменению зазора S ; измерительное усилие $F_{\text{изм}}$; частота питающего напряжения $f_{\text{пит}}=50$ Гц.

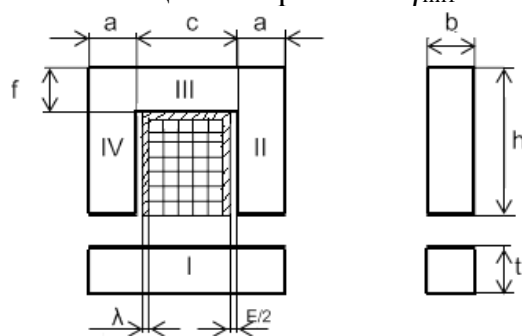


Рис. 1 – Схема электромагнитной системы индуктивного измерительного преобразователя с П-образным сердечником

Расчет таких преобразователей строится на том, что по заданным габаритным размерам определяются все его параметры. При несоответствии полученной чувствительности или измерительного усилия заданному значению принимаются определенные меры, исходя из разработанной конструкционной схемы. В других случаях принимают решение о создании дополнительных усилительных устройств. Расчет начинают с принципиальной схемы магнитной цепи и обмоток преобразователя, исходя из заданных габаритных размеров. Такие преобразователи строятся с сердечниками П-образной формы, с прямоугольным и круглым сечением. Как правило преобразователь дифференциальный (два П-образных сердечника с обмотками и один подвижный якорь). Дифференциальный преобразователь обладает более высокой чувствительностью и помехозащищенностью. В качестве материала для магнитной цепи при питании преобразователя напряжением с частотой 50 Гц, рекомендуется для П-образных магнитопроводов применять листовую сталь Э12, Э21, Э31, Э41. Для цилиндрических магнитопроводов прутковую сталь АРМКО. Для повышения частоты питания преобразователя применяются материалы с очень большим электрическим сопротивлением (хромистый или марганцевый пермаллой) или прессованные сердечники из окислов некоторых материалов (так называемые ферриты).

По известной площади окна магнитопровода, предназначенного для размещения катушки, с учетом каркаса катушки определяют максимальное количество витков:

$$w = \frac{4 f_0 Q}{\pi \cdot d_1^2}$$

где f_0 – коэффициент заполнения, d_1 – диаметр провода катушки с изоляцией, Q – площадь окна, занимаемая обмоткой катушки.



В таблице 1 приведены марки проводов и их коэффициенты заполнения, а в таблице 2 – ассортимент эмалированных проводов.

Таблица 1

Марки проводов и их коэффициенты заполнения

Марка провода	f_0
ПЭВ – 1, ПЭЛ	0,60
ПЭВ – 2	0,55
ПЭЛШО	0,50

Таблица 2

Ассортимент эмалированных проводов

Диаметр провода без изоляции d_0 , мм	Диаметр провода с изоляцией d_1 , мм			
	ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШО
0,1	0,12	0,125	0,13	0,175
0,11	0,13	0,135	0,14	0,185
0,12	0,14	0,145	0,15	0,195
0,13	0,15	0,155	0,16	0,205
0,14	0,16	0,165	0,17	0,215
0,15	0,17	0,18	0,19	0,225
0,2	0,22	-	-	-

Заданный предел изменения зазора $\Delta\delta$ и допустимая степень нелинейности характеристики преобразователя определяют такой конструктивный параметр как начальный зазор δ_0 между якорем (то есть подвижной частью) и неподвижным сердечником катушки преобразователя:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \leq 0,15 \div 0,2.$$

В этом случае нелинейность характеристики дифференциального преобразователя регулировкой может быть доведена до 1%, а недифференциального до 10%. При конструировании магнитопровода особенно из сплошной стали необходимо учитывать, что при слишком большой ширине полюса a и малом зазоре δ_0 магнитный поток будет вытеснен к краям полюса и под средней частью полюса практически не пройдет. При увеличении зазора сопротивление его будет мало изменяться, так как увеличение δ_0 сопровождается увеличением фактической площади зазора, что снижает чувствительность, поэтому рекомендуется следующее соотношение (a – ширина полюса):

$$\frac{\delta_0}{a} \leq 0,1 \div 0,2.$$

Чтобы уменьшить влияние изменения характеристик материалов магнитопроводов на параметры катушек, индуктивность в магнитопроводе выбирают такой, при которой магнитная проницаемость данного материала достигает максимального значения. Для большинства магнитных материалов эффективное значение индукции $B=0,2 \div 0,6$ Тл.

Когда построена принципиальная схема магнитной цепи преобразователя, выбран начальный зазор, индукция в магнитопроводе, выбран диаметр провода



и определено число витков в катушке, дальнейший расчет производится по следующей схеме:

Определяют магнитное сопротивление магнитопровода $R_{m\Sigma}$, состоящее из сопротивлений воздушных зазоров и сопротивлений стальных участков магнитопровода. Для упрощения расчета сопротивлениями стальных участков обычно пренебрегают.

По найденной величине $R_{m\Sigma}$ определяют полное электрическое сопротивление Z_Σ .

- Определяют ток, необходимый для получения выбранной индукции B .
- Катушку проверяют на допустимую плотность тока $j \leq 2 \div 2,5 \text{ A / мм}^2$.
- Определяют напряжение питания катушки.
- Определяют чувствительность преобразователя.
- Определяют измерительное усилие преобразователя.

Расчет преобразователя с П-образным сердечником является частным случаем расчета преобразователя с Ш-образным сердечником. Магнитная цепь обычно выполняется симметрично относительно среднего участка сердечника, на котором расположена катушка, поэтому достаточно рассчитать одну ее половину, уменьшив сечение сердечника участка вдвое и сохранив ту же величину намагничивающей силы катушки.

Определим количество витков катушки, предварительно задавшись диаметром и маркой провода, толщиной стенок каркаса катушки и зазором.

Для данного расчета примем: провод марки ПЭВ-1 диаметром $d_0=0,2 \text{ мм}$; толщиной стенок каркаса $\lambda=1,5 \text{ мм}$; величиной зазора между каркасом и магнитопроводом $E/2=1,5 \text{ мм}$. Для расчета количества витков катушки воспользуемся формулой:

$$W = \frac{4f_0 Q}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{4f_0(c-\varepsilon-\lambda)(h-2\lambda-f)}{\pi \cdot d_1^2} \text{ витка.}$$

Начальный зазор определяется соотношениями:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \leq 0,15 \div 0,2 \text{ и } \frac{\delta_0}{a} \leq 0,1 \div 0,2,$$

поэтому одновременно должно выполняться два условия:

$$\delta_0 \geq \frac{\Delta\delta}{0,15 \div 0,2} \text{ мм и}$$

$$\delta_0 \geq a(0,1 \div 0,2) \text{ мм.}$$

Выбираем δ_0 , поэтому максимальное значение зазора $\delta_{\max}=\delta_0+\Delta\delta \text{ мм}$, а минимальное $\delta_{\min}=\delta_0 - \Delta\delta \text{ мм}$. При этом чем меньше δ_0 , тем большей чувствительности можно достичь.

Зададимся величиной индукции в среднем сердечнике $B=0,3 \text{ Тл}$.

При расчете магнитной цепи удобно использовать схемы замещения. Схема замещения (рис.2) составляется сообразно конфигурации магнитопровода. Все участки магнитных сопротивлений цепи на схеме обозначены сосредоточенными магнитными сопротивлениями, а магнитодвижущая сила F катушки К показана как источник питания. Полное магнитное сопротивление цепи $Z_{m\Sigma}$ будет равно сумме сопротивлений остальных участков цепи $Z_{m_I} \div Z_{m_{IV}}$ и сумме сопротивлений двух воздушных зазоров $R_{\delta_{II}}$ и $R_{\delta_{IV}}$: $R_{m\Sigma} = Z_{m_I} + Z_{m_{II}} + Z_{m_{III}} + Z_{m_{IV}} + R_{\delta_{II}} + R_{\delta_{IV}}$.

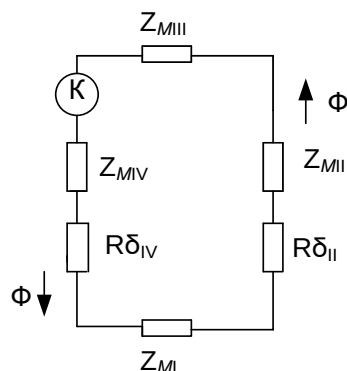


Рис.2 – Схема замещения магнитной цепи

Поскольку мы пренебрегаем величинами сопротивлений сердечников, то

$$R_{\delta_{\Sigma}} = R_{\delta_{II}} + R_{\delta_{IV}}.$$

Общий магнитный поток, создаваемый катушкой преобразователя:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi,$$

где $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$ – магнитный поток правой и левой части магнитопровода.

При расчете обычно пользуются магнитной проводимостью воздушных зазоров – величиной обратной сопротивлению R_{δ} . Магнитное поле в зазоре не является плоскопараллельным, магнитный поток выпучивается из-под полюсов. Поэтому для расчета проводимости воздушного зазора применяют метод разбивки магнитного поля на простые геометрические фигуры, проводимость которых затем и определяются по известным формулам.

В нашем случае поле разбивается на восемь простых фигур (рис.3).

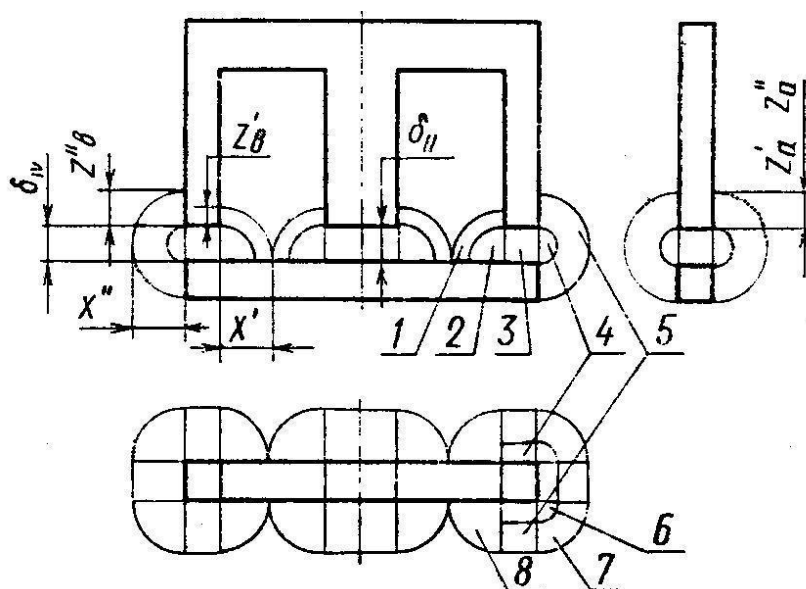


Рис.3 – Картина магнитного поля в воздушном зазоре

Координаты поля выпучивания X' , X'' , Z'_a , Z''_a , Z'_b , Z''_b определяются по графику, показанному на рис.4.

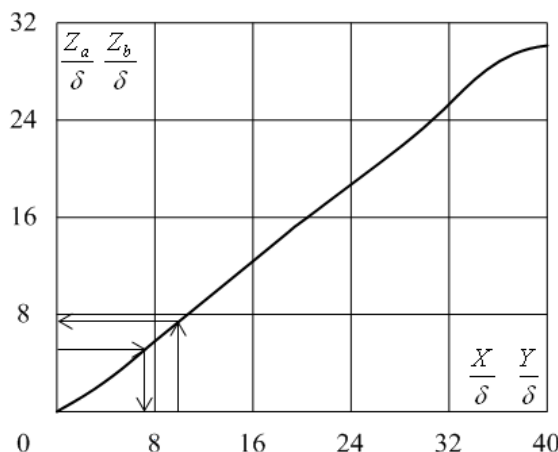


Рис.4 - Зависимость между координатами поля выпучивания

Координата X' обычно принимается равной $\frac{c}{2}$:

$$X' = \frac{c}{2} \text{ мм.}$$

Из рис.4 по известной $\frac{X'}{\delta_{\max}}$ определяем $\frac{Z'_b}{\delta_{\max}}$. Расчет удобно начинать с максимальной величины воздушного зазора $\delta_{\max}$, при которой ток, проходящий через катушку преобразователя, имеет наибольшее значение. Если при этих условиях определить параметры катушки, то плотность тока в процессе работы не превысит расчетной величины.

По величине $\frac{X'}{\delta_{\max}}$ согласно графику, показанному на рис.4, определяем: $\frac{Z'_b}{\delta_{\max}}$. Отсюда получаем Z'_b мм.

С достаточной для практики точностью рекомендуется принимать

$$Z'_a = Z''_a = Z''_b = t = a.$$

Аналогично по известному $\frac{Z''_b}{\delta_{\max}}$ по тому же графику определяем $\frac{X''}{\delta_{\max}}$. Так же определяем X'' .

Далее определим проводимости отдельных участков, показанных на рис.3.

1. Проводимость четверти полого цилиндра (фигура 1). По одной фигуре для каждого зазора:

$$G_1 = \mu_0 \frac{2b}{\pi \left(\frac{\delta_{\max}}{m_2} + 0,5 \right)};$$

$$m_2 = \frac{Z'_b + (X' - \delta_{\max})}{2},$$

где b – толщина сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$ – магнитная проницаемость для воздушного зазора.

2. Проводимость четверти цилиндра (фигура 2). По одной фигуре для каждого зазора:

$$G_2 = \mu_0 \cdot 0,52b.$$

3. Проводимость зазора под полюсами (фигура 3). По одной фигуре для каждого полюса:

$$G_3 = \mu_0 \frac{ab}{\delta}.$$



4. Проводимость половины цилиндра (фигура 4). Для зазора δ_{IV} имеется три таких фигуры, а для δ_{II} – две:

$$G_4 = \mu_0 \cdot 0,26b.$$

5. Проводимость половины полого цилиндра (фигура 5). Таких фигур в зазоре δ_{II} – две, а в зазоре δ_{IV} – три:

$$G_5 = \mu_0 \frac{2b}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m_1} + 1 \right)},$$

где m_1 – средняя толщина стенки цилиндра;

$$m_1 = \frac{z_b'' + \left(x'' - \frac{\delta_{max}}{2} \right)}{2}.$$

6. Проводимость шарового квадранта (фигура 6). Две такие фигуры только для зазора δ_{IV}

$$G_6 = \mu_0 \cdot 0,077\delta_{max}.$$

7. Проводимость квадранта полого шара (фигура 7). Только для зазора δ_{IV} имеются две такие фигуры:

$$G_7 = \mu_0 \cdot \frac{m_1}{4}.$$

8. Проводимость квадрантов сложной формы (фигура 8), заключенных между фигурами 6, 7 и 1, 2:

$$G_8 = 2G_6 + 2G_7.$$

Таким образом, магнитная проводимость воздушных зазоров определяется как сумма их составляющих.

Для зазора δ_{IV} :

$$G_{\delta_{IV}} = G_1 + G_2 + G_3 + 3G_4 + 3G_5 + 2G_6 + 2G_7 + 2G_8.$$

Магнитное сопротивление зазора δ_{IV} :

$$R_{\delta_{IV}} = \frac{1}{G_{\delta_{IV}}}.$$

Для зазора δ_{II} :

$$G_{\delta_{II}} = G_1 + G_2 + G_3 + 2G_4 + 2G_5 + 2G_8;$$

$$R_{\delta_{II}} = \frac{1}{G_{\delta_{II}}} \Gamma_H^{-1}.$$

В зависимости от типа сердечника: П- или Ш-образный суммарное магнитное сопротивление определяется 2 различными способами:

Для Ш-образного суммарное магнитное сопротивление одной половины цепи определяем по формуле:

$$R'_{m\Sigma} = R_{\delta_{II}} + R_{\delta_{IV}} \Gamma_H^{-1}.$$

Суммарное магнитное сопротивление всей цепи определяем по формуле:

$$R_{m\Sigma} = \frac{R'_{m\Sigma}}{2} \Gamma_H^{-1}.$$

Для П-образного суммарное магнитное сопротивление всей цепи определяем по формуле:

$$R_{m\Sigma} = R_{\delta_{IV}} \Gamma_H^{-1}.$$



Определяем полное электрическое сопротивление при максимальном воздушном зазоре. Зная магнитное сопротивление цепи, можно определить электрическое сопротивление Z_{Σ} катушки преобразователя:

$$Z_{\Sigma} = R_a + \frac{\omega \cdot w^2}{R_{M\Sigma}},$$

где R_a – активное (омическое) сопротивление преобразователя; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота, Гц.

$$R_a = \rho \frac{l_{cp}}{q} w,$$

где $\rho = 0,0174 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление для медной проволоки; l_{cp} – средняя длина витка, м; $q = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4}$ – поперечное сечение голого провода, мм^2 .

На рис.5 изображена схема расположения катушки на сердечнике электромагнитной системы.

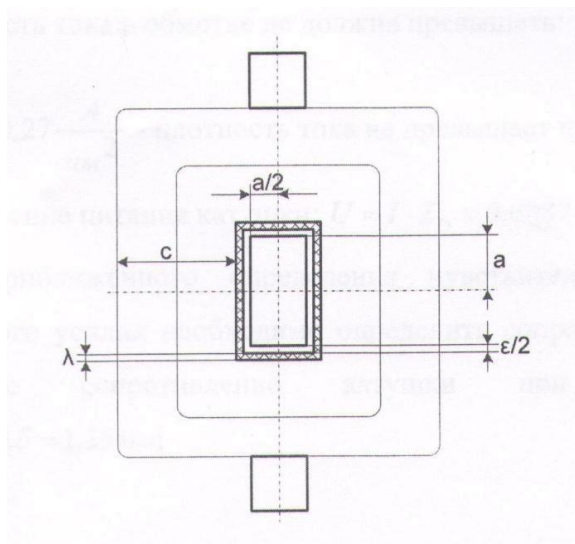


Рис.5. - Схема расположения катушки на сердечнике электромагнитной системы

Среднюю длину витка в данном случае можно определить по следующей формуле:

$$l_{cp} = 4(h - a - \lambda) + 8\lambda + 2\varepsilon + 4a = 4(h + \lambda) + 2\varepsilon.$$

Определяем ток, плотность тока, напряжение питания при максимальном воздушном зазоре.

Эффективное значение тока, протекающего через катушку преобразователя, для создания выбранной магнитной индукции ($B=0,3 \text{ Тл}$),

$$I = \frac{\Phi_{\Sigma} R_{M\Sigma}}{w\sqrt{2}} = \frac{B 2ab R_{M\Sigma}}{w\sqrt{2}},$$

где $\Phi_{\Sigma} = BS$ – магнитный поток в сердечнике; S – площадь сечения среднего сердечника.

Плотность тока в обмотке не должна превышать значения

$$j = \frac{I}{q} \leq 2 \div 2,5 \text{ А/мм}^2,$$

$$j = \frac{I}{(\pi \cdot d^2)/4}.$$

Напряжение питания катушки



$$U = I \cdot Z_3.$$

Далее необходимо определить магнитное сопротивление, электрическое сопротивление, ток, плотность тока, напряжение питания при минимальном воздушном зазоре. При расчете используются аналогичные формулы с отличием, что в формулах используют δ_{min} , а не δ_{max} .

Определение чувствительности, окончательное определение напряжение питания, максимального и минимального токов

Таким образом, при изменении зазора между якорем и неподвижным сердечником на величину $\pm \Delta \delta$ мм сопротивление катушки изменилось на величину

$$\Delta Z_3 = Z_{\delta min} - Z_{\delta max}.$$

Считая, что чувствительность S во всем диапазоне измерений постоянна, получим

$$S = \frac{\Delta Z_3}{2 \cdot \Delta \delta} = \frac{195}{0,5}.$$

Для получения заданной чувствительности S_0 Ом/мм можно намотать некоторое количество витков при условии запаса по плотности тока.

Так как чувствительность зависит от полного электрического сопротивления Z_3 , а оно в данном случае в основном зависит от реактивной составляющей, которая в свою очередь пропорциональна квадрату количества витков катушки, то в первом приближении необходимо увеличить количество витков в

$$\sqrt{\frac{S}{S_0}}.$$

Таким образом, количество витков примем равным

$$w1 = \frac{w}{\sqrt{\frac{S}{S_0}}}.$$

Выполним необходимые расчеты для $w1$. Длина средней линии l_{cp} увеличится и составит

$$l_{cp} = \frac{4(h-a-\lambda)}{\sqrt{\frac{S}{S_0}}} + 8\lambda + 2\varepsilon + 4a.$$

По уже известным формулам происходит перерасчет R_a , а соответственно и других параметров, таких как $Z_{\delta min}$, $Z_{\delta max}$, чувствительность S . При необходимости можно проделать еще одну аналогичную итерацию, но по увеличению количества витков для достижения заданной чувствительности точно.

Эффективное значение максимального тока, протекающего через катушку преобразователя, напряжение питания катушки и ток при минимальном зазоре:

$$I_{\delta min} = \frac{U}{Z_{3min}}.$$

Сама страница с расчетами представлена в виде HTML страницы [3]. HTML страница связана с такими технологиями, как JavaScript [4, 5], CSS [3].

Результатом работы программы является страница со списком рассчитанных величин рисунки 6 - 9. На рисунке 6 представлен ввод данных. На рисунках 7 и 8 представлен расчет для максимального и минимального зазора соответственно. На рисунке 9 – расчет выходных данных.

В таблице 3 представлены результаты расчета для разных значений исходных данных.



a:

c:

h:

dDq - Величина изменения зазора:

S - чувствительность к изменению зазора:

Физм - измерительное усилие:

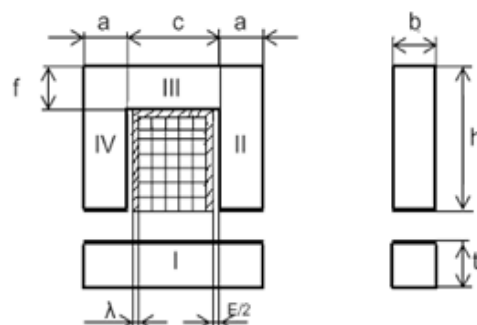


Рис. 6 - Ввод данных

Пункт_2
Количество витков W:4896
 $q_0 \geq 1.25 \% 1.67$
 $q_0 \geq 0.7 \% 1.4$
 $q_0 \geq 1.25 \% 1.4$
 $q_{\min}=0.91; q_{\max}=1.4$
 $X'=10; X'/q_{\max}=7.15; Z'b/q_{\max}=5.81; Z'b=8.13$
 $Z'a = Z''a = Z''b = t = 7$
 $X''/q_{\max} = 6.16; X''=8.62$
 $m_2 = 8.3625$
 $G_1 = 8.4 \cdot 10^{-9}$
 $G_2 = 4.58 \cdot 10^{-9}$
 $G_3 = 43.96 \cdot 10^{-9}$
 $G_4 = 2.29 \cdot 10^{-9}$
 $m_1 = 7.46$
 $G_5 = 4.72 \cdot 10^{-9}$
 $G_6 = 0.14 \cdot 10^{-9}$
 $G_7 = 2.35 \cdot 10^{-9}$
 $G_8 = 4.96 \cdot 10^{-9}$
 $G_{iii} = 92.79 \cdot 10^{-9}$
 $R_{iii} = 10777308241606332 \cdot 10^{-9}$
 $G_{ii} = 80.84 \cdot 10^{-9}$
 $R_{ii} = 12371260108877580 \cdot 10^{-9}$
 $R'm = 23.15 \cdot 10^6$
 $R_m = 11.58 \cdot 10^6$
 $l_{cp} = 132$
 $R_a = 35.82$
 $Z_a = 651.3$
 $I = 0.05$
 $j = 1.59$
Уменьшим индукцию до 0.15
 $I = 0.03$
 $j = 0.8$
 $U = 16.17$

Рис. 7 - Расчета для максимального зазора



$X'=10$; $X'/q_{min}=11.12$; $Z'b/q_{min}=9.03$; $Z'b=8.13$
 $Z'a = Z''a = Z''b = t = 7$
 $X''/q_{min} = 9.58$; $X''=8.62$
 $m2 = 8.62$
 $G1 = 9.27 \cdot 10^{-9}$
 $G2 = 4.58 \cdot 10^{-9}$
 $G3 = 68.39 \cdot 10^{-9}$
 $G4 = 2.29 \cdot 10^{-9}$
 $m1 = 7.582692307692308$
 $G5 = 5.01 \cdot 10^{-9}$
 $G6 = 0.09 \cdot 10^{-9}$
 $G7 = 2.39 \cdot 10^{-9}$
 $G8 = 4.94 \cdot 10^{-9}$
 $G_{iii} = 118.91 \cdot 10^{-9}$
 $R_{iii} = 8410338963344667 \cdot 10^{-9}$
 $G_{ii} = 106.68 \cdot 10^{-9}$
 $R_{ii} = 9374400284351972 \cdot 10^{-9}$
 $R'm = 17.79 \cdot 10^6$
 $Rm = 8.9 \cdot 10^6$
 $l_{cp} = 132$
 $Ra = 35.82$
 $Zэ = 847.2$

Рис. 8 - Расчеты для минимального зазора

$dZe = 195.91$
 $S = 391.81$
 $S/S0 = 1.62$
 новое количество витков $newW = 3030$
 новая длина $newL_{cp} = 71.22$
 новое сопротивление $newRa = 119.57$
 $Zq_{min} = 854.85$
 $Zq_{max} = 661.21$
 $newS = 387.27$
 $Iq_{max} = 0.09$
 $newJ = 2.56$
 Уменьшим плотность до $0.15 Tл$
 $Iq_{max} = 0.05$
 $newJ = 1.28$
 $U = 26.53$
 $Iq_{min} = 0.04$

Рис. 9 - Расчет выходных данных

Таблица 3.

Результаты расчета

Исходные данные						Выходные параметры				
						W, шт.	Максимальный зазор		Минимальный зазор	
							Zэ, Ом	I, А	Zэ, Ом	I, А
a, мм	c, мм	h, мм	Δδ, мм	S, Ом/мм	Физм, Н					
7,0	20	30	0,3	150	12,0	3030	661,2	0,0803	854,85	0,0622
8,0	25	25	0,3	200	12,0	3614	652,7	0,7670	807,40	0,0620
5,0	15	30	0,2	100	8,0	2206	597,2	0,0778	907,90	0,0512
7,5	20	25	0,3	100	14,0	2340	374,0	0,1040	520,00	0,0748
8,0	20	30	0,3	150	12,0	3122	680,0	0,0894	680,00	0,0720
9,0	25	25	0,2	300	15,0	2039	950,0	0,1000	1460,00	0,0650
5,0	15	25	0,2	50	8,0	1697	175,0	0,1000	217,00	0,0776



Список цитируемой литературы

1. Шишмарев В.Ю. Физические основы получения информации: учеб. пособие – М.: Академия, 2011. – 448 с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи). – Л: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
3. Haverbeke М..Выразительный JavaScript. – Санкт-Петербург: Питер 2019. – 480 с.
- 4.Фриман Э., Элизабет Р., Haverbeke М.Изучаем программирование на *JavaScript*. – Санкт-Петербург: Питер 2018. – 640 с.
5. Макфарланд Д. Новая большая книга CSS. – Санкт-Петербург: Питер 2018. – 720с.

© И.О. Блажко, Е.С. Гульматова, А.Ю. Полухин, Е.Н. Чернышова 2020