

## РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СОЛЕНОИДНОГО МОЛОТКА

Н. П. Ряшенцев

### Условные обозначения

- $A$  — энергия удара молотка, кгм;  
 $f$  — частота тока, гц;  
 $n$  — число ударов в минуту;  
 $m$  — количество катушек молотка;  
 $S$  — ход бойка, см;  
 $d_6$  — диаметр бойка, мм;  
 $r_6$  — радиус бойка, мм;  
 $l_6$  — общая длина бойка, мм;  
 $g$  — толщина стенки направляющей трубы, мм;  
 $d_2$  — внешний диаметр магнитного полюса катушки, мм;  
 $G_6$  — вес бойка, кг;  
 $\rho_1$  — усредненный удельный вес стали 40ХН и 1Х18Н9Т, кг/дм<sup>3</sup>;  
 $\rho_2$  — удельный вес меди, кг/дм<sup>3</sup>;  
 $F_{cp}$  — средняя сила тяги бойка, кг;  
 $\eta$  — к. п. д. молотка, %;  
 $\eta_m$  — магнитный к. п. д. молотка, %;  
 $\cos \varphi$  — коэффициент мощности молотка;  
 $A_m$  — электромагнитная энергия соленоидов за полный цикл хода бойка, кгм;  
 $g_6$  — площадь поперечного сечения бойка, см<sup>2</sup>;  
 $I$  — действующее значение тока соленоида, а;  
 $U$  — напряжение сети, в;  
 $W$  — число витков соленоида;  
 $IW$  — число ампервитков соленоида, ав;  
 $P$  — активная мощность молотка, кВт;  
 $g_n$  — сечение обмоточного провода соленоида, мм<sup>2</sup>;  
 $i$  — плотность тока, а/мм<sup>2</sup>;  
 $d$  — диаметр обмоточного провода, мм;  
 $K_1$  — коэффициент амплитуды кривой тока;  
 $R$  — омическое сопротивление катушки, ом;  
 $l_k$  — длина провода катушки, м;  
 $\rho_m$  — удельное электрическое сопротивление меди, оммм<sup>2</sup>/м;  
 $Q$  — сечение окна катушки соленоида, мм<sup>2</sup>;  
 $d_n$  — наружный диаметр катушки, см;  
 $d_{\text{в}}$  — внутренний диаметр катушки, см;  
 $l_{\text{в}}$  — средняя длина витка катушки, см;  
 $G_m$  — вес меди соленоида, кг;

$l_1$  и  $l_2$  — высота полюса в местах паразитных зазоров, см;  
 $\Phi_p$  — расчетный магнитный поток зазора, мкс;  
 $B_{\max, п.}$  — максимальная индукция полюса соленоида, гс/см<sup>2</sup>;  
 $l_x$  — высота полюса катушки при его радиусе  $r_x$ , см;  
 $h$  — высота катушки соленоида, см.

### Расчет электрической части многокатушечного молотка

Существующие методы расчета электромагнитов не всегда достаточно хорошо соответствуют практике. Эти способы расчета не учитывают форму диаграммы тока, питающего соленоид, не определяют рациональных параметров катушки, не вскрывают картину динамического процесса молотка.

Теоретические исследования динамики электромагнита постоянного и переменного синусоидального тока приведены в работах [1—6]. Однако авторы этих работ указывают, что теоретические исследования динамики электромагнита очень трудны (сложны) и в настоящее время теоретические исследования динамики электромагнита решены недостаточно. Указанные методы расчета позволяют лишь приближенно оценить величины, характеризующие рабочий процесс. И совершенно нет расчета соленоидных молотков, работающих по схеме, показанной на рис. 1.

Прежде чем делать описание динамики соленоидного молотка, необходимо произвести предварительный выбор его основных параметров.

При питании катушек молотка по схеме, изображенной на рис. 1, а, осциллограмма тока показана на рис. 1, б. Из схемы питания и осциллограммы тока видно, что ток, протекающий через катушки, несинусоидален за счет включения нелинейной индуктивности. Частота тока, питающего катушку, 25 гц.

Работа электромагнитных сил, действующих на боек, определяется активной мощностью молотка, которую он должен отдать рабочему инструменту.

Известно [5], что при рациональной конструкции магнитной системы молотка Синтрон магнитный к. п. д.  $\eta_m$  составляет не более 50%.

Расчетное значение ампервитков определяется из выражения

$$\Phi_p I \eta_m = A \cdot 10^3. \quad (1)$$

По техническим условиям следует принять размеры бойка — диаметр  $d_6$  и длину  $l_6$ .

Тогда вес бойка будет

$$G_6 = \frac{\pi d_6^2}{4} l_6 \rho_1, \quad (2)$$

где  $\rho_1$  — усредненный удельный вес стали 40ХН и 1Х18Н9Т, кг/дм<sup>3</sup>;

$$\rho_1 = \frac{\rho' V' + \rho'' V''}{V' + V''},$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  — соответственно удельный вес стали 40ХН и 1Х18Н9Т,  $\text{кг/см}^3$ ;

$V'$  и  $V''$  — соответственно объем стали 40ХН и 1Х18Н9Т,  $\text{см}^3$ .

Для заданной энергии удара скорость бойка перед моментом удара определяем по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2A}{m}} = \sqrt{\frac{2Ag}{G_6}}. \quad (3)$$

Учитывая потери на трение бойка о стенки направляющей трубы, к. п. д. отдачи пружины и удар бойка о пружину [5], составляющие 10% энергии удара, определим необходимую электромагнитную энергию соленоидов за полный цикл хода бойка

$$A_{\Sigma} = \frac{A}{0,9} = \frac{mv^2}{2 \cdot 0,9}. \quad (4)$$

Определим число ампервитков. При максимальной магнитной индукции в бойке  $B_{\max} = 16000 \text{ гс/см}^2$  расчетный поток одной катушки будет

$$\Phi_p = B_{\max} g_6 = B_{\max} \frac{\pi d_6}{4}. \quad (5)$$

Ампервитки одного соленоида определяются из выражения [5, стр. 63].

$$A = \frac{1}{2} m l W \Phi_p 10^{-9},$$

откуда

$$l W = \frac{2A}{m \Phi_p 10^{-9}}. \quad (6)$$

В соответствии с работами [5 и 6] к. п. д. соленоида составляет  $\eta = 40\%$ , а  $\cos \varphi = 0,6$ .

Действующее значение тока в катушке определится

$$I = \frac{P}{m U \eta \cos \varphi}, \quad (7)$$

где

$$P = \frac{A n}{60 \cdot 102}. \quad (8)$$

Амплитудное значение тока будет

$$I_{\max} = K_1 I, \quad (9)$$

где  $K_1$  — коэффициент амплитуды кривой тока, который равен отношению амплитудного значения тока к действующему значению

$$K_1 = \frac{I_{\max}}{I}. \quad (10)$$

При питании катушки молотка по схеме, приведенной на рис. 1,  $K_1 = 4,2$  (значение  $K_1$  подсчитано из осциллограммы тока катушки, записанной во время работы соленоидного молотка).

Число витков в соленоиде

$$W = \frac{IW}{I_{\max}} \quad (11)$$

Сечение обмоточного провода соленоида

$$g_{\text{н}} = \frac{I}{i}, \quad (12)$$

где  $i$  — плотность тока; для молотка МС-3 с водяным охлаждением и обмоточного провода с теплостойкой изоляцией принимаем  $i = 5 \text{ а/мм}^2$ .

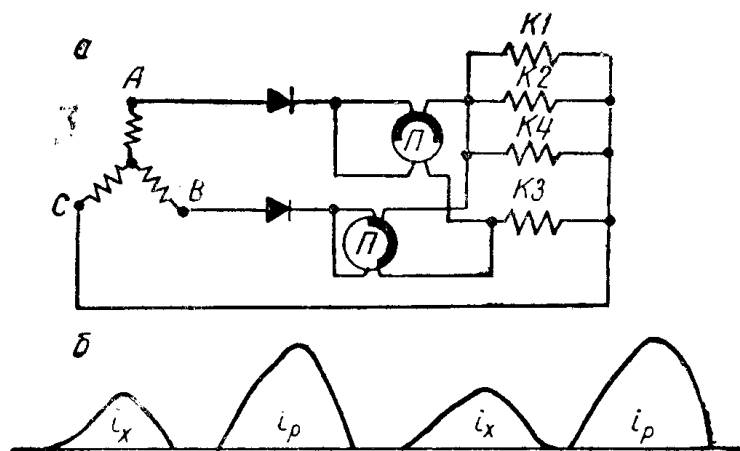


Рис. 1. Схема включения катушек молотка МС-3 (а) и осциллограмма тока (б).

Диаметр провода

$$d = \sqrt{\frac{4g}{\pi}} \quad (13)$$

Общее сечение окна катушки соленоида при коэффициенте заполнения  $K_{\text{м}}$  будет

$$Q = \frac{gW}{K_{\text{м}}} \quad (14)$$

Внутренний диаметр катушки определяется уравнением

$$d_{\text{в}} = d_0 + 2g.$$

При наружном диаметре катушки  $d_{\text{н}}$  высота ее будет

$$h = \frac{2Q}{d_{\text{н}} - d_{\text{в}}} \quad (15)$$

Средняя длина витка на чертеже равна

$$l_{\text{в}} = \pi \frac{d_{\text{в}} + d_{\text{н}}}{2}. \quad (16)$$

Омическое сопротивление катушки

$$R = \rho_{\text{м}} \frac{l_{\text{к}} 10^{-2}}{g} = \rho_{\text{м}} \frac{\pi (d_{\text{в}} + d_{\text{н}}) W}{2g}. \quad (16a)$$

**Пример.** Рассчитать соленоидный молоток, удовлетворяющий следующим техническим условиям:

1. Энергия удара  $A = 3 \text{ кгм}$ .
2. Частота ударов  $n = 1500 \text{ уд/мин}$ .
3. Коэффициент полезного действия  $\eta = 40\%$ .
4. Допустимая температура нагрева катушки  $t^0 = 90^\circ \text{ С}$ .
5. Охлаждение водяное.
6. Напряжение сети  $U = 127 \text{ в}$ .
7. Замена изношенных частей должна производиться просто и быстро.

Принимаем конструкцию молотка четырехкатушечной и размеры бойка — диаметр  $d_6 = 26 \text{ мм}$  и длину  $l_6 = 380 \text{ мм}$ , тогда вес бойка будет

$$G_6 = \frac{3,14 \cdot 0,26}{4} \cdot 3,8 \cdot 8,0 = 1,62 \text{ кг}.$$

Скорость бойка перед моментом удара

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 9,81}{1,62}} = 6,0 \text{ м/сек}.$$

Электромагнитная энергия четырех соленоидов молотка

$$A_{\text{м}} = \frac{3,0}{0,9} = 3,34 \text{ кгм}.$$

Магнитный поток одного соленоида

$$\Phi_{\text{р}} = 16\,000 \frac{3,14 \cdot 2,6^2}{4} = 85\,000 \text{ мкс}.$$

Потребное число ампервитков одного соленоида

$$IW = \frac{2 \cdot 3,34 \cdot 10^9}{4 \cdot 85 \cdot 10^3} = 19\,640 \text{ ав}.$$

Действующее значение тока катушки

$$I = \frac{3 \cdot 1500 \cdot 10^3}{60 \cdot 102 \cdot 4 \cdot 127 \cdot 0,40 \cdot 0,60} = 6,28 \text{ а}.$$

Амплитудное значение тока

$$I_{\text{max}} = 4,2 \cdot 6,28 = 26,4 \text{ а}.$$

Число витков катушки

$$W = \frac{19\,640}{26,4} = 744 \text{ витка}.$$

Сечение обмоточного провода катушки

$$g_{\text{п}} = \frac{6,28}{5} = 1,26 \text{ мм}^2.$$

Диаметр обмоточного провода катушки

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,26}{3,14}} = 1,26 \text{ мм.}$$

Принимаем по ГОСТу провод ПСД-1, 20, тогда коэффициент заполнения катушки  $K_n = 0,54$ . Сечение окна катушки будет

$$Q = \frac{1,26 \cdot 800}{0,54} = 1870 \text{ мм}^2.$$

При внутреннем диаметре катушки  $d_s = 30 \text{ мм}$  и наружном  $d_n = 93 \text{ мм}$  высота катушки будет

$$h = \frac{1870 \cdot 2}{93 - 30} = 60 \text{ мм.}$$

Средняя длина витка

$$l_s = \frac{3,14(30 + 93)}{2} = 194 \text{ мм.}$$

Сделаем проверку подсчитанного числа витков катушки по формуле

$$W = \frac{UK_2}{4,44\Phi_{ср.т}f} - \frac{(IW)R}{2U} \left( 2\sin\theta + \frac{4,44\Phi_{ср.т}fRIW}{U^2 - 8,88\Phi_{ср.т}fR(IW)\sin\theta} \right), \quad (17)$$

приведенной в литературе [6],

где  $K_2$  — коэффициент амплитуды кривой тока; при питании катушки по схеме, изображенной на рис. 1,  $K_2 = 0,45 \cdot 1,57 = 0,71$  [8];

$\Phi_{ср.т.}$  — амплитуда среднего потока катушки,  $\theta$  — с;  $\Phi_{ср.т} = \Phi_p$ ;

$IW$  — действующее значение намагничивающей силы катушки

$$IW = \frac{IW_{\max}}{K_1};$$

$R$  — сопротивление катушки

$$R = \rho \frac{l_k}{g} 10^{-2} \text{ ом}; \quad (18)$$

$l_k$  — длина провода катушки

$$l_k = \pi \left( \frac{d_s + d_n}{2} \right) W = l_s W \text{ м};$$

$f$  — частота тока, питающего катушки,  $f = 25 \text{ гц}$ ;

$\theta$  — угол сдвига по фазе между  $\Phi_{ппр}$  и  $IW$ ; для магнитных цепей без короткозамкнутых витков с ничтожно малыми потерями в стали  $\theta = 0$ , тогда

$$W = \frac{UK_2}{4,44\Phi_{ср.т}f} - \frac{4,44\Phi_{ср.т}f(IWR)^2}{2U^3}. \quad (19)$$

По заданным техническим условиям примера подсчитываем число витков катушки по формуле (19).

Действующее значение намагничивающей силы катушки

$$IW = \frac{19\,640}{4,2} = 4,680 \text{ ас.}$$

Омическое сопротивление катушки

$$R = 1,725 \cdot 10^{-5} \frac{3,14 (30 + 93) 800}{2 \cdot 1,26} = 2,05 \text{ ом.}$$

Число витков катушки

$$W = \frac{127 \cdot 0,71}{4,44 \cdot 0,00085 \cdot 25} - \frac{4,44 \cdot 0,00085 \cdot 25 (4680 \cdot 2,05)^2}{2 \cdot 127^3} =$$

$$= 956 - 2,0 = 954 \text{ витка.}$$

Из расчета видно, что при  $R \ll \frac{U}{R}$  вторую составляющую правой части уравнения можно приравнять нулю и число витков катушки определять по формуле

$$W = \frac{U}{4,44 \Phi_{\text{ср.т}} f} \quad (20)$$

Из проверочного расчета следует, что число витков катушки, подсчитанное по формуле (17), больше на 210 витков, определенных по формуле (11). Учитывая опыт изготовления соленоидных молотков и результаты их испытания, принимаем число витков катушки  $W = 800$ .

Форму полюсов катушек принимаем из условия минимально возможных паразитных зазоров между внутренним диаметром полюса и бойком, а также между внешним диаметром полюса и корпусом молотка. Исходя из сказанного, принимаем высоту полюса в местах паразитных зазоров  $l_1 = 20 \text{ мм}$  и  $l_2 = 10 \text{ мм}$ , а промежуточные размеры высоты полюса определяем из условия получения постоянной величины индукции по сечению полюса. Задаваясь максимальной индукцией  $B_{\text{мах.п.}} = 13000 \text{ гс/см}^2$  и радиусом полюса, определяем его высоту по формуле

$$l_x = \frac{\Phi_p}{2\pi r_x B_{\text{мах.п.}}} = \frac{85000}{2 \cdot 3,14 \cdot 12000 r_x} = \frac{1,15}{r_x}, \quad (21)$$

где  $r_x$  — радиус полюса, см.

Необходимо отметить, что в вышеприведенных методах расчета размеры бойка принимаются из конструктивных соображений. При этом не учитываются геометрические размеры катушек и несинусоидальность тока за счет включения нелинейной индуктивности [5], которая зависит от схемы питания катушек и величины хода бойка. Поэтому ниже приводим расчет с учетом основных размеров катушек.

### Расчет электрической части соленоидного молотка с учетом формы катушек

По заданным техническим условиям ранее приведенного примера выбираем оптимальные размеры катушки и бойка из условия минимальных потерь при следующих физических параметрах:

- коэффициент теплопроводности  $K_t = 4,4 \cdot 10^3 \text{ вт/см}^2\text{°C}$ ;
- коэффициент теплоотдачи  $h = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2\text{°C}$ ;
- максимальная температура нагрева катушки  $t_{\text{мах}} = 90^\circ \text{C}$ ;
- удельный вес обмоточного провода  $\rho_2 = 8,8 \text{ г/см}^3$ ;
- коэффициент заполнения катушки  $K_m = 0,56$ ;
- удельное сопротивление меди  $\rho_m = 1,725 \cdot 10^{-2} \text{ ом мм}^2/\text{м}$ .

Определяем ампервитки на единицу длины катушки по формуле, приведенной в работе [1],

$$\frac{IW}{2C} = \frac{200 \sqrt{\frac{K_M K t}{\rho_M} (r_2 - r_1)}}{\sqrt{\frac{p-g}{m-n} \left( \ln \frac{p-g}{m-n} - 1 \right) + 2 \frac{gm-pn}{m-n}}}, \quad (22)$$

где  $2C$  — длина катушки;

$r_1$  и  $r_2$  — соответственно внешний и внутренний радиус катушки;

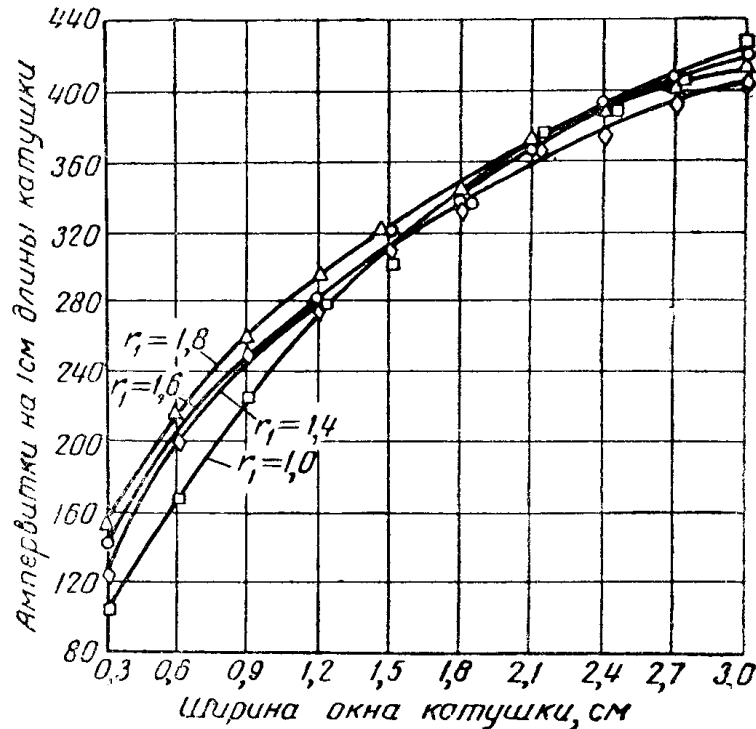


Рис. 2. Зависимость ширины окна катушки от удельных значений ампервитков на единицу длины катушки.

$\delta = r_2 - r_1$  — ширина окна катушки;

$$p = \frac{r_2^2}{2} + \frac{K_T r_2}{h}; \quad m = \ln r_2 + \frac{K}{h r_2};$$

$$g = \frac{r_1^2}{2} - \frac{K r_1}{h}; \quad h = \ln r_1 - \frac{K}{h r_1}$$

Задаваясь значениями  $\delta = r_2 - r_1$  (рис. 3) в промежутке от 0,3 до 2,1 и сохраняя другие размеры катушки, находим по уравнению (23) зависимость между ампервитками, затрачиваемыми для проталкивания магнитного потока на 1 см длины катушки  $\frac{IW}{2C} = aW$ , и шириной окна катушки  $\delta$  (лежащие в известных пределах) при заданной длине катушки.



Если известен магнитный поток, который определяется по формуле (6), то каждому выбранному значению  $r_1$  соответствует определенная индукция, а следовательно, и ампервитки на 1 см длины катушки, необходимые для рабочего магнитного потока. Тогда по формуле  $\frac{IW}{2C} = f(\delta)$  (рис. 2), определяем наивыгоднейший радиус для различных значений ампервитков на единицу длины катушки

$$IW_0 = IW - IW_T = \text{const},$$

где  $IW_T = 2CaW_T$  — ампервитки, затрачиваемые для проведения магнитного потока через боек.

Результаты расчета  $\frac{IW}{2C} = f(\delta)$  для заданных значений  $r_1$  и  $r_2$  сводятся в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$r_1$	$r_2$	$\delta = r_2 - r_1$	$p = \frac{r_2^2}{2} + \frac{K r_2}{h}$	$g = \frac{r_1^2}{2} - \frac{K r_1}{h}$
1	2	3	4	5

$m = \ln r_2 + \frac{K}{hr_2}$	$n = \ln r_1 - \frac{K}{hr_1}$	$\ln \frac{p-g}{m-n} - 1$	$2 \frac{gm-pn}{m-n}$	$\frac{IW}{2C}$
6	7	8	9	10

Зададимся значением  $r_1 = 1,4$  см, тогда, учитывая толщину изоляции катушки 0,05 см и направляющей трубы 0,12 см, радиус бойка будет  $r_6 = 1,25$  см. При магнитном потоке  $\Phi_p = 85\,000$  мкс индукция в бойке определяется из выражения

$$B_6 = \frac{\Phi_p}{\pi r_6^2} = \frac{85\,000}{4,75} = 17\,800 \text{ гс}.$$

По кривой намагничивания находим для данной индукции  $B_6 = 17\,800$  гс значение ампервитков на единицу длины бойка

$$\frac{IW_T}{2C} = aw_T$$

для заданных значений  $\frac{IW_0}{2C}$ , которые условно принимаем 200, 300, 400 ав/см. Эти ампервитки необходимы для проталки-

вания магнитного потока на 1 см длины катушки, которые определяются из уравнения

$$\frac{IW}{2C} = \frac{IW_0}{2C} + \frac{IW_r}{C}. \quad (23)$$

По найденному значению ампервитков определяем из графика (рис. 2) ширину окна катушки  $\delta$ . Тогда наружный радиус катушки будет  $r_2 = r_1 + \delta$ .

Вес 1 см длины катушки определяем по формуле

$$\frac{G}{2C} = \rho_2 K_T \pi (r_2^2 - r_1^2). \quad (24)$$

По уравнению (24) определяем вес 1 см длины катушки для отношения  $\frac{IW_0}{2C}$ , равного 200, 300 и 400 ав/см. Результаты

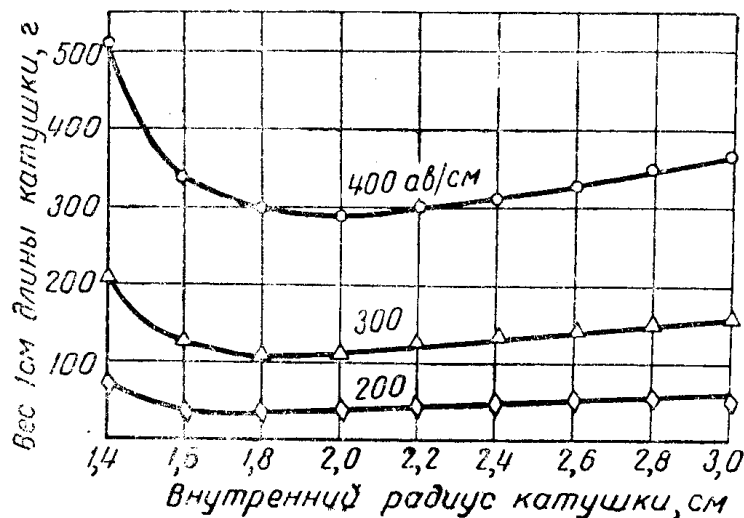


Рис. 3. Зависимость веса единицы длины катушки от ее внутреннего радиуса.

расчета изображены на рис. 3, из которого видно, что наимыгоднейшее значение радиуса  $r_1$  для заданных параметров лежит в пределах 1,6—2,0 и мало зависит от величины  $\frac{IW}{2C}$ .

При  $r_1 = 1,80$  см радиус бойка получается  $r_6 = 1,63$  см, индукция в бойке  $B_6 = 10\,200$  гс. Учитывая, что молоток относится к быстродействующему электромагниту и желание, чтобы боек работал близко к насыщенному режиму, принимаем  $r_1 = 1,60$  см, тогда получим  $r_6 = 1,43$  см и  $B_6 = 13\,900$  гс.

После определения внутреннего радиуса катушки необходимо определить рациональную длину и внешний ее радиус, т. е. найти такую длину катушки, которая при минимальном весе обладала бы минимальными электрическими потерями. Для этого находим зависимость между минимальными потерями в магни-

топроводе и катушке при различной длине. Электрические потери в катушке со сталью определяются выражениями:

$$P_v = \sigma_v \left( \frac{f}{100} \cdot \frac{B_{\max}}{1000} \right)^2 G_c; \quad (25)$$

$$P_r = \sigma_r \frac{f}{100} \left( \frac{B_{\max}}{10\,000} \right)^2 G_c; \quad (26)$$

$$P_m = I^2 R, \quad (27)$$

где  $P_v$  и  $P_r$  — потери на вихревые токи и гистерезис на 1 кг стали;

$P_m$  — омические потери в катушке;

$f$  — частота тока;

$B_{\max}$  — максимальная магнитная индукция;

$G_c$  — вес магнитопровода;

$\sigma$  и  $\sigma_r$  — коэффициенты, зависящие от сорта стали и геометрических размеров магнитопровода.

Магнитопровод катушки изготавливается из прессованных порошковых материалов с поперечными прорезями для устранения короткозамкнутых витков и работает при максимальной индукции  $B_{\max} = 10-12 \cdot 10^3$  (кроме бойка). Учитывая также, что магнитопровод не должен перемагничиваться, принимаем удельные потери на гистерезис и вихревые токи для принятого материала магнитопровода такие же, как и у качественной конструкционной отожженной стали  $P_c = 6$  Вт/кг [4]. Учитывая, что удельные потери в магнитопроводе в 2—3 раза больше удельных потерь в стали, приведенных в таблице, принимаем удельные потери в стали  $P_c = 18$  Вт/кг [4].

Тогда

$$P_c = P_v + P_r = 18 G_c.$$

Прежде чем определять минимальные потери в стали катушки, необходимо вычислить ее минимальный вес. Площадь окна катушки определяется из выражения (14) и равна  $Q = 1870$  мм<sup>2</sup>. При максимальной индукции в магнитопроводе катушки  $B_{\max} = 10\,000$  гс вес полюса в зависимости от  $r_2$  определяется из уравнения

$$G_n = \frac{\Phi_{\max}}{B_{\max}} \rho_{ст} K_n (r_{n2} - r_{n1}) = 2\pi r_n \rho_{ст} - K_n (r_{n2} - r_{n1}), \quad (28)$$

где  $r$  — радиус полюса, подсчитанный по формуле (21);

$r_{n1}$  и  $r_{n2}$  — внутренний и внешний радиусы полюса;

$\rho_{ст}$  — удельный вес конструктивной стали,  $\rho_{ст} = 7,85$  кг/дм<sup>3</sup>;

$K_n$  — коэффициент заполнения магнитопровода,  $K_n = 0,8$ .

Тогда

$$G_{\text{я}} = \frac{85\,000}{10\,000} 8,75 \cdot 0,8 (r_2 - 0,16) = (59,5r_2 - 95,2) \text{ г.}$$

Вес ярма катушки определяется из уравнения

$$G_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{B_{\text{max}}} \rho_{\text{ст}} K_{\text{п}2} (C + h_2) = \rho_{\text{ст}} K_{\text{п}2} (C + h_2) (r_{\text{я}2} - r_{\text{я}1}), \quad (29)$$

где  $r_{\text{я}1}$  и  $r_{\text{я}2}$  — внутренний и внешний радиусы ярма;  
 $h_2$  — высота полюса при  $r_{\text{я}2}$ .

В уравнение (29) подставляем численные значения известных величин, тогда вес ярма определится из выражения

$$G_{\text{я}} = \frac{85\,000}{10\,000} \cdot 8,75 \cdot 0,8 \cdot 2 (C + h_2) = 119 (C + h_2) \text{ г.}$$

Вес бойка

$$G_{\text{б}} = \pi r_{\text{б}}^2 \rho_{\text{ст}} 2 (C + h_1), \quad (30)$$

где  $h_1$  — высота полюса при  $r_{\text{н}1}$ , тогда

$$G_{\text{б}} = 3,14 \cdot 1,43^2 \cdot 8,75 \cdot 2 (C + h_1) = 113 (C + h_1) \text{ г.}$$

При  $r_{\text{н}1} = 1,6 \text{ см}$  и  $h_1 = 0,73 \text{ мм}$  вес бойка будет  $G_{\text{б}} = 113C + 83 \text{ г.}$

Задаваясь значением длины катушки  $2C$ , находим зависимость  $P_{\text{с}} = 18G_{\text{с}} = f_1(2C)$ , которая изображена на рис. 4 (зависимость веса стали  $G_{\text{с}}$  от длины катушки приведена на рис. 5).

Омические потери в катушке подсчитываются из условий: рабочая температура катушки  $t^0 = 90^\circ \text{С}$ , провод медный, диаметр провода  $b_{\text{п}} = 1,3 \text{ мм}$ , ток  $I = 6,28 \text{ а}$ , площадь окна катушки  $Q = 1870 \text{ мм}^2$ .

Сопротивление катушки определяется из уравнения

$$R = \rho_{\text{м}} \frac{l_{\text{ср}}}{g} W \cdot 10^{-3}, \quad (31)$$

$\rho_{\text{м}} = \rho_0 (1 + \alpha \Delta t)$  — удельное сопротивление меди;

$\rho_0 = 0,01754$  — удельное сопротивление меди при  $t^0 = 20^\circ \text{С}$ ;

$\alpha = 0,00393$  — температурный коэффициент меди;

$\Delta t = 90^\circ - 20^\circ = 70^\circ \text{С}$ ;

$l_{\text{ср}} = \frac{\pi (D_{\text{н}1} + D_{\text{н}2})}{2}$  — средняя длина витка, мм;

$D_{\text{н}1}$  и  $D_{\text{н}2}$  — наружный и внутренний диаметр катушки, мм;

$g = \frac{\pi d^2}{4}$  — сечение голой проволоки, мм<sup>2</sup>.

Подставляя значения величин, входящих в уравнение (32), получим

$$R = \rho_0 (1 + \alpha \Delta t) \frac{2(D_{n1} + D_{n2})}{d^2} W \cdot 10^{-3}, \quad (33)$$

или

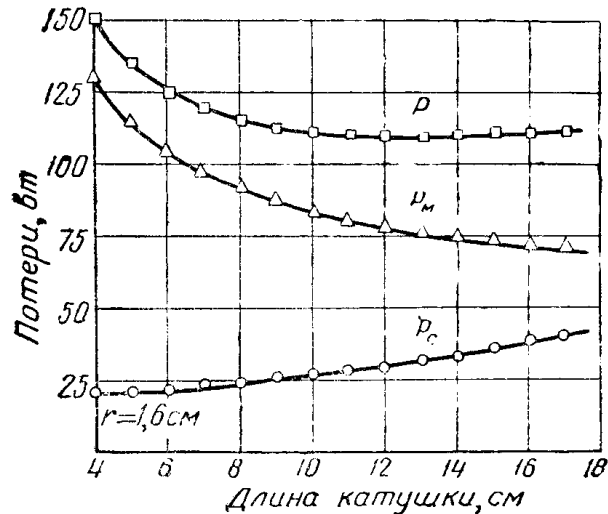
$$\begin{aligned} R &= 0,01754 (1 + 0,0393 \cdot 70) \frac{2(16 + D_{n2})}{1,30^2} \cdot 800 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,021 (32 + D_{n2}) \text{ ом}, \end{aligned}$$

или

$$R = 0,042 (r_1 + r_2) = 0,67 + 0,042 r_2 \text{ ом}.$$

Задаваясь значением длины катушки  $2C$ , находим зависимость  $P_m = I^2 R = f(2C)$ , которая изображена на рис. 4. Из рис. 4

Рис. 4. Зависимость потерь катушки от ее длины.



видно, что при  $r_1 = 1,6$  см минимум электрических потерь для заданного молотка получается при  $2C = 11-13$  см, и  $r = 3,04-3,27$  см.

Кроме того, что молоток имеет высокий к. п. д., он должен быть и легким. Чтобы отыскать минимальный вес бойка, определяем вес катушки  $G$  в зависимости от ее длины  $2C$  и находим минимум этой функции

$$G = G_c + G_m = f(2C),$$

где  $G_c = 2G_n + G_a + G_6$ , — вес стали катушки, который определяется уравнениями (28, 29 и 30);

$G_m = \rho_2 \frac{\pi d^2}{4} l_{cp} W$  — вес меди катушки.

Подставляя в формулу  $G_m$  значение  $l_{cp}$ , получим

$$G_m = \rho_2 \frac{(\pi d)^2 (D_{n1} + D_{n2})}{8} W \quad (34)$$

где  $\rho_2 = 8,3 \text{ кг/дм}^3$  — объемный вес меди,  $d = 1,3 \text{ мм}$  — диаметр голой проволоки;  $d_{п1} = 1,6 \text{ см}$ .

Подставляя значения величин, входящих в уравнение (34), получим

$$G_{\text{м}} = \frac{8,8 (3,14 + 0,013)^2 (1,60 + D_{\text{п1}}) 800}{8} = 234,5 + 146,5 D_{\text{п2}} \text{ г},$$

или

$$G_{\text{м}} = (234,5 + 293 r_2) \text{ г}.$$

По результатам расчета строим график зависимости веса катушки от ее длины (рис. 5), из которого видно, что минимальный вес катушки получается при  $2C = 7-9 \text{ см}$ . При  $2C > 8 \text{ см}$  электрические потери уменьшаются незначительно (рис. 4).

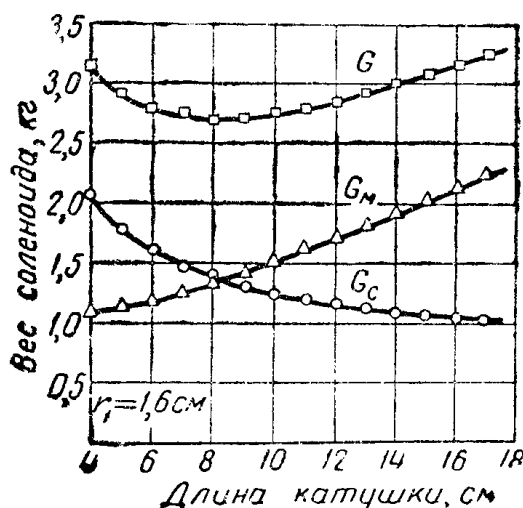


Рис. 5. Зависимость веса соленоида от длины катушки.

На основании приведенного расчета оптимальные параметры катушки для данного молотка приведены в табл. 2.

По оптимальным параметрам катушки и средней силе тяги бойка производим определение числа витков катушки.

Для получения энергии удара равной  $3 \text{ кгм}$  при ходе бойка  $S = 4 \text{ см}$  необходимо среднее усилие (средняя сила тяги бойка) на одну катушку

$$F_{\text{к}} = \frac{A}{S_{\text{м}}} = \frac{3}{0,04 \cdot 4} = 18,8 \text{ кг}. \quad (35)$$

Таблица 2

Параметры	Обозначение	Числовые значения
Радиус бойка, мм . . . . .	$r_6$	14,3
Внутренний радиус полюса, мм . . . . .	$r_1$	16,0
Внешний радиус полюса, мм . . . . .	$r_2$	39,2
Длина, мм . . . . .	$2C$	80,0
Вес стали, кг . . . . .	$G_{\text{с}}$	1,323
Вес меди катушки, кг . . . . .	$G_{\text{м}}$	1,389
Вес катушки, кг . . . . .	$G$	2,712

Для расчета суммарной электромагнитной силы тяги бойка необходимо определить силу тяги отдельно каждой катушки молотка в соответствии с изменением тока при различных положе-

ниях бойка. Затем эти силы сложить с учетом времени их действия и места положения бойка в этот момент. Аналитическое выражение этих сил очень сложно и их приходится находить графоаналитическим способом, который требует значительного времени. Поэтому производим расчет молотка упрощенно, допуская при этом, что средняя сила тяги бойка получается при

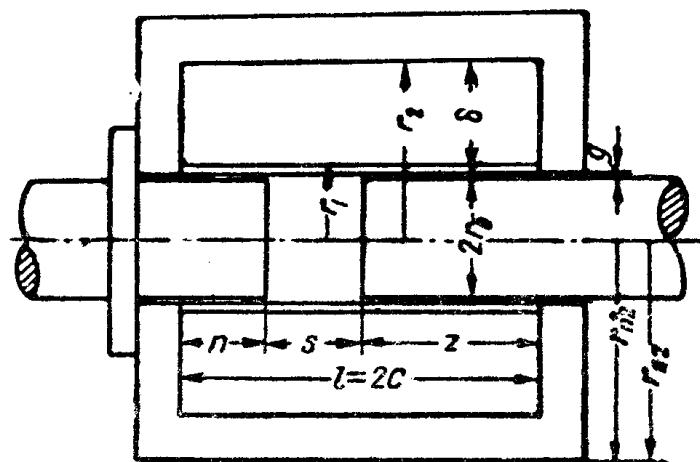


Рис. 6. Схема катушки соленоидного молотка.

его ходе равном  $S : 2 = 2$  см. Число витков катушки [1] определяется следующим уравнением:

$$W = \frac{\sqrt{\frac{0,1 (K_2 U \cdot 10^4)^2 P}{F_k}}}{f}, \quad (36)$$

где  $K_2$  — коэффициент формы напряжения, который зависит от схемы питания молотка; при питании катушки молотка по схеме, изображенной на рис. 1,  $K_2 = 0,45 \cdot 1,57 = 0,71$  [8];

$U = 127$  в — напряжение сети;

$f = 50$  гц — частота;

$P$  — коэффициент геометрии катушки

$$P = \frac{\frac{\pi r_0^2}{S^2} + g \left( \frac{z}{l} \right)^2}{\left[ \frac{\pi r_0^2}{S} + g \frac{z^2 + n^2}{3l^2} \right]}, \quad (37)$$

обозначения в формуле (37) показаны на рис. 6;

$g = \frac{2\pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$  — проводимость рассеяния на единицу длины сердеч-

ника.

Подставляя принятые параметры катушки в формуле (37) и (36), получим:

$$g = \frac{2 \cdot 3,14}{\ln \frac{3,92}{1,43}} = 6,2;$$

$$P = \frac{\frac{3,14 + 1,43^2}{2^2} + 6,2 \left( \frac{4}{8} \right)^2}{\left[ \frac{3,14 + 1,43^2}{2} + 6,2 \frac{4^3 + 2^3}{3 \cdot 8^2} \right]} = 0,093;$$

$$W = \frac{\sqrt{\frac{0,1 (0,71 \cdot 127 \cdot 10^4)^2 \cdot 0,093}{18}}}{25} = 815.$$

Сравнивая результаты расчета катушек по формулам (11), (17) и (36) с изготовленными и испытанными образцами соленоидных молотков [7], нами установлено, что наиболее точно соответствуют практике результаты расчета, полученные по формуле (36). Причем формула (36) учитывает выбор оптимальных параметров катушки, что очень важно для расчета легкого ручного инструмента с минимальными электрическими потерями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Б у й л о в. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
2. А. И. М о с к в и т и н. Работа притяжения постоянного магнита. Электричество, № 1, 1939.
3. Р о т е р с. Электромагнитные механизмы. Госэнергоиздат, 1951.
4. Ф. А. С т у п е л ь. Расчет и конструирование электромагнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.
5. Н. А. Ш м а р о в. Электроотбойный молоток для каменноугольной промышленности. ОНТИ НКТП, 1935.
6. Электротехнический справочник. Госэнергоиздат, 1952.
7. Н. П. Р я ш е н ц е в. К вопросу создания электрических бурильных машин. Научные доклады высшей школы, серия горное дело, № 3, 1958.
8. Академия наук СССР. Полупроводники в науке и технике, том. 1, Изд. АН СССР, 1957.



# ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По вине
96	Рис. 2	$n = 0,6 \sqrt{\frac{Q \cdot p}{m \cdot S}} +$	$n = 0,6 \sqrt{\frac{Q \cdot p}{m \cdot S}} \cdot$	авт.
153	21 сверху	$l_k - 70 \text{ мм,}$	$l_k = 700 \text{ мм,}$	тип.
160	12 сверху	износом	износом	»
182	Рис. 2,а	цифры 2 и 3 поменять местами	фиксируемых	авт.
189	8 сверху	фиксацией	фиксируемых	»
198и	Формулы	$q$	$q_n$	»
199	(14) и (16а)			
200	14 сверху	коэффициент амплитуды кривой	коэффициент формы	»
205	12 сверху	$\sigma$ и $\sigma$	$\sigma_b$ и $\sigma_r$	»
208	2 сверху	$d_{n1} =$	$D_{n1} =$	»
		$4,186$	$4,186$	
212	6 снизу	$= \frac{t}{t}$	$= \frac{t_0}{t_0}$	»
276	15 снизу	второй ступени	шестерен второй ступе- ни при	»
287	14 снизу	$v_1, v_2$ и $v_3$	$V_1, V_2$ и $V_3$	»
287	Формула (12)	$\frac{2t_0 + t'_{ш} + t'_{ш}}{L}$	$\frac{2t_0 + t'_{ш}}{L}$	тип.
287	Формула (13)	$\frac{2t_0 + t''_{ш}}{L}$	$\frac{2t_0 + t'_{ш} + t''_{ш}}{L}$	авт.
292	2 сверху	(кривая $I$ ,	(кривая $I'$ ,	»