

О ПАРАМЕТРАХ СОЛЕНОИДНОГО МОЛОТКА СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, Е. М. ТИМОШЕНКО, А. В. ФРОЛОВ, А. П. ТРОНОВ

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Над созданием электрических машин ударного действия соленоидного типа работают более ста лет. Однако до настоящего времени наша промышленность не выпускает электрические соленоидные молотки, которые можно было бы применять во многих областях народного хозяйства. Главной причиной, тормозящей промышленное применение ранее предлагаемых соленоидных молотков, является их техническое несовершенство, объясняемое отсутствием стройной теории соленоидного привода.

Работы, проведенные в Томском политехническом институте (ТПИ), указывают на возможность создания работоспособной конструкции электрического молотка соленоидного типа. В институте был разработан и изготовлен опытный образец многокатушечного соленоидного молотка с синхронным безыскровым переключателем [2—7]. Решена задача создания молотка* без переключателя.

Конструкция такого молотка разработана в ТПИ и представлена на рис. 1, а, схема включения — на рис. 1, б, схема молотка — на рис. 1, в, осциллограммы хода S , тока i и напряжения U изображены на рис. 1, г.

Молоток состоит из инструмента 1, закрепленного в переднем фланце 3, бойка 4, движущегося в диамагнитной направляющей трубе 6, катушки 7 с полюсами 5 и ярмом 8, корпуса 9, буфера 11 с пружиной 10, текстолитовым поршнем 13 и выключателя 12. При включении катушки молотка по схеме однополупериодного выпрямления боек начинает совершать возвратно-поступательное движение. Условимся называть движение бойка в сторону инструмента (патрона) рабочим ходом, а движение бойка в сторону пружины — холостым ходом. Величины воздушных зазоров, имеющих место в начале рабочего и холостого хода, будем называть начальным воздушным зазором соответственно при рабочем и холостом ходе.

Положение бойка в катушке, при котором величины воздушных зазоров равны, будем называть средним положением бойка (относительно катушки), или положением магнитного равновесия. При работе молотка величина хода бойка от среднего положения до патрона

* В решении этого вопроса значительную помощь оказала работа [1], выполненная профессором — доктором технических наук А. И. Москвитиным.

определяет величину начального воздушного зазора при холостом ходе, а величина хода бойка до пружины и ее деформация определяют начальный воздушный зазор при рабочем ходе.

Если не принимать во внимание отскок бойка от патрона, то холостой ход бойка осуществляется только под действием электромагнитных сил.

Рабочий ход бойка осуществляется за счет электромагнитных сил и упругих сил пружины, аккумулирующей кинетическую энергию бойка при холостом ходе бойка.

Импульсы тока, обуславливающие перемещение бойка в рабочем и холостом направлении, назовем соответственно импульсами тока при рабочем и холостом ходе.

При нормальной работе молотка протекание тока в катушке прекращается при подходе бойка к среднему положению. Однако боек не останавливается, а под действием накопленной кинетической энергии свободно выбегает до пружины при холостом ходе и до патрона при рабочем ходе. Поэтому молотки, работающие на таком принципе, названы соленоидными молотками со свободным выбегом бойка.

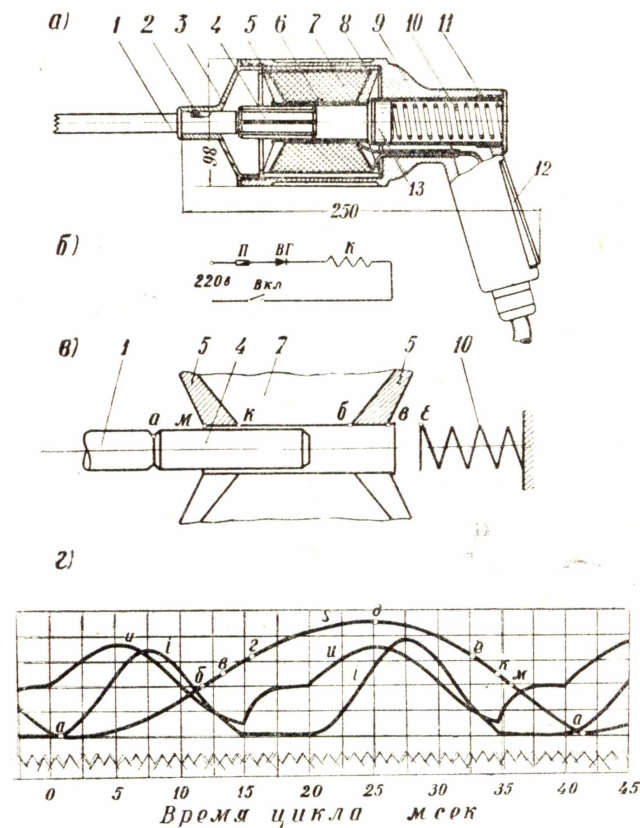


Рис. 1. Соленоидный молоток с свободным выбегом бойка:

а—конструкция; б—схема питания; в—схема молотка; г—осциллограмма движения бойка S , напряжения U и тока I .

Кроме описанного однокатушечного молотка по приведенной схеме могут работать двух-трех и более катушечные молотки, боек при этом должен состоять из звеньев ферромагнитного и диамагнитного материала [4, 5, 8].

Устойчивое возвратно-поступательное движение бойка соленоидного молотка наблюдается при широком изменении коэффициента жесткости пружины и величины свободного хода бойка до патрона и пружины.

На рис. 2 приведены осциллограммы перемещения бойка S , тока i и напряжения U , подводимого к катушке. Приведенные осциллограммы характеризуют работу молотка при следующих условиях:

- а) при отсутствии пружины и удара бойка о патрон (рис. 2, а);
- б) при отсутствии пружины и наличия удара бойка о патрон (рис. 2, б);
- в) при наличии удара бойка о патрон и сжатия пружины (рис. 2, в, г, д).

Устойчивая работа молотка наблюдается и при ударе бойка о патрон при рабочем ходе и о жесткий ограничитель при холостом ходе бойка.

Приведенные осциллограммы записывались с помощью шлейфового осциллографа Н-102 при различных величинах свободного хода бойка и всех прочих неизменных условиях.

Линиями 1, 2 и 3 (рис. 2) соответственно отмечены положения патрона, магнитного равновесия и пружины. Точка *a* на кривой хода бойка *S* соответствует моменту удара бойка о патрон, точки *b* и *c* — положению магнитного равновесия бойка соответственно при холостом и рабочем ходе. Точка *d* соответствует моменту касания бойка пружины при холостом, а точка *f* — моменту гарантированного отрыва бойка от пружины при рабочем ходе. Импульсы тока при рабочем и холостом ходе бойка соответственно обозначены i_2 и i_1 .

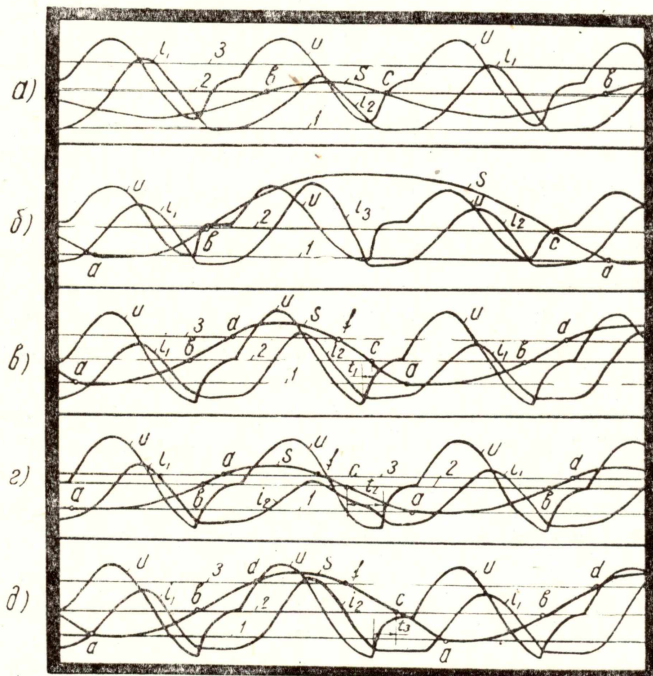


Рис. 2. Осциллограммы рабочего процесса соленоидного молотка:

a—при отсутствии удара о патрон и пружину; *б*—при ударе бойка о патрон и отсутствии удара о пружину; *в*, *г*, *д*—при ударе бойка о патрон и наличии сжатия пружины.

Режимы работы молотка, представленные на рис. 2, *a* и рис. 2, *б*, практического значения для машин ударного действия не имеют, так как в первом случае (рис. 2, *a*) нет удара о патрон, а во втором случае (рис. 2, *б*) боек при холостом ходе тормозится электромагнитными силами, обуславливаемыми током i_3 , протекающим в катушке. Кинетическая энергия, накапливаемая бойком при холостом ходе, в этом случае не используется для ускорения движения бойка при рабочем ходе.

Наибольший практический интерес представляет такой режим работы молотка (рис. 2, *в*, *г*, *д*), при котором боек наносит удар по патрону и кинетическая энергия, накопленная бойком при холостом ходе, аккумулируется пружиной, а при рабочем ходе бойка снова превращается в кинетическую энергию.

Следует отметить, что не вся потенциальная энергия, накопленная пружиной, передается бойку при рабочем ходе. Это объясняется тем, что кроме упругих сил пружины на боек действуют электромагнитные

силы катушки, которые уменьшают при определенных условиях до нуля усилие контакта между бойком и пружиной. При меньшей жесткости пружины меньшая доля потенциальной энергии превращается в кинетическую энергию бойка, при большей жесткости — большая, но усилия, возникающие в результате собственных колебаний пружины большой жесткости, могут выводить боек из синхронизма. Очевидно, что параметры пружины должны быть вполне определенными для каждого типа молотка.

При нормальной величине хода до инструмента и пружины боек подходит к положению магнитного равновесия одновременно с моментом исчезновения тока в катушке. Близким к такому идеальному режиму является режим работы молотка, представленный на рис. 2, в. Здесь ток в катушке при рабочем и холостом ходе прекращается почти одновременно с моментом подхода бойка к среднему положению. При недостаточной величине свободного хода до пружины (рис. 2, с) боек подходит к положению магнитного равновесия на время t_2 раньше исчезновения тока в катушке, импульс тока при рабочем ходе бойка растягивается и, в результате электромагнитного торможения, резко снижается скорость движения бойка. При чрезмерно большой величине свободного хода до пружины (рис. 2, д) ток в катушке при рабочем ходе бойка прекращается задолго (t_3) до момента подхода бойка к среднему положению, что влечет за собой увеличение мощности, потребляемой катушкой. Полезная мощность молотка при этом не увеличивается, а уменьшается. Это видно на рис. 2, в, д по углу наклона кривой хода бойка S в точке a к горизонтальной оси. Из вышесказанного видно, что недостаточная и избыточная величины свободного хода бойка до патрона и пружины ведет к уменьшению к. п. д. и полезной мощности, приходящейся на единицу веса молотка.

Вес соленоидного молотка в первую очередь определяется электромагнитной нагрузкой его активных материалов (плотностью тока в обмотке и магнитной индукцией в бойке). Влияние на вес также оказывает соотношение размеров окна катушки и сечения бойка. Наличие оптимального соотношения между наружным и внутренним диаметром соленоида можно установить, полагая энергию, отдаваемую соленоидом Q , пропорциональной произведению потока на число ампервитков

$$Q = k\Phi_m I_m w. \quad (1)$$

Максимальное значение магнитного потока Φ_m определяется поперечным сечением бойка

$$\Phi_m = B_m \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (2)$$

где

B_m — максимальная индукция в бойке;
 d_0 — диаметр бойка.

Величина B_m не должна превышать индукции насыщения для принятого материала бойка, так как при больших значениях индукции в результате резкого увеличения сопротивления магнитопровода тяговые усилия растут весьма слабо при значительном увеличении подводимой мощности и тепловых потерь.

Максимальное значение намагничивающей силы $I_m w$ ограничивается площадью окна катушки и определяется выражением

$$I_m w = \frac{f_k q}{k_a} S_k, \quad (3)$$

где

f_k — коэффициент заполнения окна катушки медью;
 q — допустимая плотность тока в катушке;
 k_a — коэффициент амплитуды кривой тока;
 S_k — площадь окна катушки.

Или, принимая внутренний диаметр катушки $d_k = d_6$ для катушки с прямоугольной формой окна, получим

$$I_m \omega = \frac{f_k q}{k_a} \cdot \frac{D_k - d_6}{2} l_k, \quad (4)$$

где

l_k — длина катушки;
 D_k — наружный диаметр катушки.

Подставляя в выражения (1) значения $\Phi_n I_m \omega$, получим

$$Q = k' d_6^2 (D_k - d_6), \quad (5)$$

где

$$k' = \frac{k \pi B_m f_k q l_k}{8 k_a}.$$

Из приведенной формулы видно, что при увеличении диаметра бойка до наружного диаметра катушки мощность, отдаваемая катушкой, будет стремиться к нулю. При уменьшении диаметра бойка до нуля мощность Q также стремится к нулю.

Взяв производную выражения (5) по d_6 и приравняв ее нулю, можно при вышепринятом допущении определить оптимальное соотношение между наружным диаметром катушки и диаметром бойка (внутренним диаметром катушки)

$$\frac{dQ}{d(d_6)} = k'(2D_k d_6 - 3d_6^2) = 0$$

или

$$3d_6^2 - 2d_6 D_k = 0,$$

откуда

$$d_6 = \frac{2}{3} D_k. \quad (6)$$

При определении оптимального соотношения между наружным диаметром катушки и диаметром бойка не принимались во внимание масса и движение бойка, поэтому полученное соотношение (6) нельзя считать оптимальным. Однако приведенные рассуждения показывают наличие оптимальных соотношений геометрических параметров катушки и бойка.

Длина бойка также оказывает существенное влияние на режим работы молотка. Так, увеличивая длину бойка, можно устранять электромагнитное торможение его при выходе из катушки. Однако при этом увеличивается масса бойка, что при том же самом импульсе силы снижает кинетическую энергию бойка во столько раз, во сколько раз увеличивается масса бойка. Поэтому для того, чтобы увеличить кинетическую энергию при одинаковом импульсе силы, следует уменьшать массу бойка за счет его длины, используя полюса 5 (рис. 1, а, в), выполненные в виде усеченных конусов.

При этом, изменяя угол наклона полюса, можно в широких пределах изменять массу бойка. Вес обточенной меди при равных массах

бойка и намагничивающих силах для катушки с конусообразной формой окна (рис. 3) будет

$$G_k = \gamma k_3 \frac{b+h}{2} a l_{cp}, \quad (7)$$

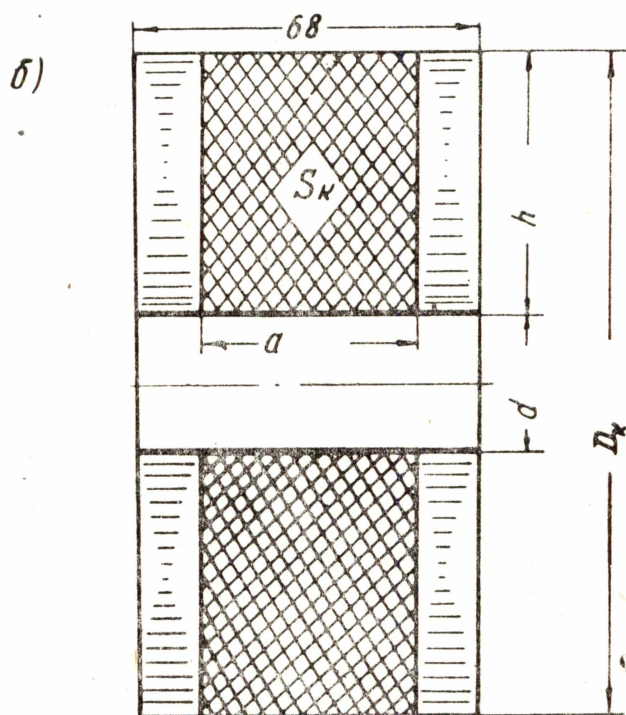
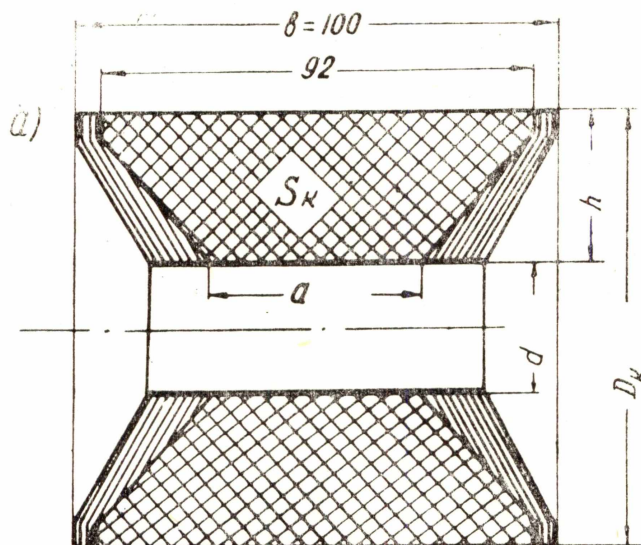


Рис. 3. К определению рациональной геометрии соленоида.

где

γ — объемный вес обмоточного провода;

k_3 — коэффициент заполнения катушки;

b — высота окна катушки по внешнему диаметру;

h — высота окна катушки по внутреннему диаметру;

a — ширина окна катушки;

l_{cp} — средняя длина витка.

Для упрощения расчета пренебрегаем переходом окна в прямоугольную форму у внешнего диаметра катушки. Тогда средняя длина витка катушки [9]

$$l_{cp} = 2\pi \left[\frac{D}{2} - \frac{a(b+2h)}{3(b+h)} \right] \quad (8)$$

где D — внешний диаметр катушки.

После преобразования уравнения (7) получим

$$G_k = \pi \gamma k_3 (b+h) a \times \left\{ \frac{a}{d} \left[1 - \frac{b+2h}{3(b+h)} \right] + \frac{1}{2} \right\},$$

где d — внутренний диаметр катушки.

Вес катушки с прямоугольной формой окна (рис. 3)

$$G_n = \gamma k_3 S_k l_{cp} = \pi \gamma k_3 a h (a+d).$$

В катушке с прямоугольной формой окна

$$h = b.$$

Тогда уменьшение веса катушки с конусообразной формой окна по сравнению с катушкой с прямоугольной формой окна будет

$$\frac{G_k}{G_n} = \frac{(b+h) \left\{ \frac{a}{d} \left[1 - \frac{b+2h}{3(b+h)} \right] + \frac{1}{2} \right\}}{h(a+d)}$$

Таким образом, изменяя угол наклона полюса, можно менять в широких пределах массу бойка и уменьшать расход обмоточной меди или алюминия.

Выводы

Так как накладываются ограничения на величину действующего значения тока, обусловленную допустимыми потерями на нагрев молотка, и на время движения бойка до момента выхода его из положения магнитного равновесия, из рассмотренного выше следует, что имеются следующие оптимальные параметры соленоидного молотка:

- а) диаметр обмоточного провода и число витков катушки;
- б) геометрические параметры окна катушки и бойка;
- в) угол наклона полюсов;
- г) жесткость пружины;
- д) величина выбега бойка до патрона и пружины.

С целью повышения к. п. д. и энергии удара, приходящейся на единицу веса молотка, экспериментально-теоретические исследования соленоидных молотков должны быть направлены на определение перечисленных выше параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвитин А. И., Электрические машины возвратно-поступательного движения. АН СССР, 1950.
2. Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М., Соленоидные молотки. Известия Томского политехнического института, т. 108, Металлургиздат, Свердловск, 1959.
3. Алабужев П. М., Ряшенцев Н. П., Некоторые результаты испытания соленоидного молотка МС-3. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, № 7, 1958.
4. Ряшенцев Н. П., Исследование динамики соленоидных молотков. Известия Томского политехнического института, т. 108, Металлургиздат, Свердловск, 1959.
5. Алабужев П. М., Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М., Некоторые вопросы исследования соленоидных машин ударного действия. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, № 2, 1959.
6. Ряшенцев Н. П., Синхронный безыскровый переключатель. Известия ТПИ, т. 106, Металлургиздат, Свердловск, 1953.
7. Ряшенцев Н. П., Синхронный безыскровый переключатель кулачкового типа. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 7, 1959.
8. Алабужев П. М., Ряшенцев Н. П., Применение метода подобия и размерностей к расчету соленоидных молотков. Известия Томского политехнического института, т. 108, 1959.
9. Ряшенцев Н. П., Замена медного провода катушки соленоидного молотка алюминиевым. Вестник электропромышленности, № 8, 1961.