

К ТЕОРИИ СОЛЕНОИДНОГО МОЛОТКА СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, Е. М. ТИМОШЕНКО

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Конструкция и схема питания соленоидного молотка [1] со свободным выбегом бойка проста. Этого нельзя сказать о динамике и процессах, происходящих в молотке при его работе. Обязательным условием получения наибольшего значения к. п. д. молотка является отсутствие электромагнитного торможения бойка при выходе его из положения магнитного равновесия. Электромагнитное торможение бойка будет отсутствовать в том случае, когда протекание тока в катушке прекращается до момента выхода его из нейтрального положения. С другой стороны, если ток в катушке будет прекращаться задолго до выхода бойка из нейтрального положения, то будет занижена полезная энергия, отдаваемая катушкой, так как при небольшой величине воздушного зазора имеет место большее значение проводимости и силы тяги катушки при меньшей величине намагничивающей силы.

Наилучший режим работы молотка с точки зрения получения наибольшего к. п. д. наблюдается тогда, когда выход бойка из нейтрального положения соответствует моменту времени, находящемуся между прекращением тока в катушке и моментом свертывания магнитного поля соленоида, т. е. моментом, когда магнитная индукция $B = 0$, или равна остаточной индукции.

Время между моментом прекращения тока в катушке и моментом свертывания магнитного поля (магнитное запаздывание) определяется свойствами магнитопровода и конструктивным исполнением молотка. Величина и характер изменения тока в катушке определяется переходным процессом, протекание которого зависит от электромагнитных свойств магнитопровода, электрических параметров цепи (активного сопротивления R , индуктивности L) и скорости их изменения при работе молотка. Скорость изменения электрических параметров цепи определяется скоростью движения бойка, а следовательно, массой бойка и величиной движущих и тормозных сил.

Аналитическое определение оптимальных параметров [1] возможно только при решении уравнения движения бойка в общем виде, что встречает большие трудности, так как динамика молотка характеризуется системой нелинейных дифференциальных уравнений.

Ниже приводится вывод уравнения, описывающего динамику молотка при следующих допущениях: а) магнитное сопротивление маг-

нитопровода отсутствует, б) магнитное сопротивление главного воздушного зазора пропорционально его длине, в) потери на вихревые токи и гистерезис отсутствуют.

Исходя из энергетического баланса соленоида, мгновенное значение силы тяги катушки определяется выражением

$$F = \frac{w}{2} \left(i \frac{d\Phi}{d\delta} - \Phi \frac{di}{d\delta} \right). \quad (1)$$

Без учета сопротивления магнитопровода мгновенное значение потока будет

$$\Phi = 4\pi \cdot 10^{-7} w i G,$$

откуда

$$d\Phi = 4\pi \cdot 10^{-7} w (i dG + G di).$$

Подставив значения Φ и $d\Phi$ в выражение (1), получим

$$F = 2\pi \cdot 10^{-7} w^2 i^2 \frac{dG}{d\delta}, \quad (2)$$

где G — проводимость воздушного зазора. Пренебрегая потоками рассеяния согласно [2], проводимость G определяется уравнением

$$G = \frac{S_b}{\delta_0 - \int_0^t V dt}, \quad (3)$$

где

S_b — площадь воздушного зазора;
 δ_0 — величина начального воздушного зазора;
 V — скорость движения бойка.

Из основного уравнения движения

$$F - F_m = m \frac{dV}{dt}$$

скорость бойка

$$V = \frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{m} \int_0^t (F - F_m) dt, \quad (4)$$

где

m — масса бойка;
 F — сила тяги, развиваемая катушкой;
 F_m — сумма сил сопротивления движению бойка;
 δ — величина перемещения бойка.

Если подставить полученное значение V в выражение (3), проводимость воздушного зазора будет

$$G = \frac{S_b}{\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt}. \quad (5)$$

Тогда производная проводимости по времени выразится

$$\frac{dG}{dt} = \frac{S_B \int_0^t (F - F_m) dt}{m \left[\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt \right]^2}. \quad (6)$$

Умножим и разделим уравнение (2) на dt и в полученное выражение подставим (4) и (6), тогда сила тяги катушки определится

$$F = 2\pi \cdot 10^{-7} \omega^2 i^2 \frac{S_B}{\left[\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt \right]^2}. \quad (7)$$

Изменение тока i во времени обуславливается уравнением электрического равновесия, которое при движущемся бойке имеет вид

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{di}. \quad (8)$$

Для того, чтобы определить характер изменения силы тяги катушки во времени, необходимо решить совместно уравнения (7) и (8). Для этого заменим величины, входящие в уравнение (8), их значениями.

Индуктивность катушки

$$L = 4\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} G$$

или, подставляя значение проводимости воздушного зазора, получим

$$L = \frac{4\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_B}{\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt}. \quad (9)$$

Производная индуктивности катушки по времени определится выражением

$$\frac{dL}{dt} = \frac{4\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_B \int_0^t (F - F_m) dt}{m \left[\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt \right]^2}. \quad (10)$$

Из уравнения (7) ток, протекающий в катушке,

$$i = \frac{F \left[\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt \right]}{\sqrt{2\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_B}}. \quad (11)$$

и производная тока по времени

$$\frac{di}{dt} = \frac{\frac{dF}{dt} \left[\delta_0 - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt \right] - \frac{2F}{m} \int_0^t (F - F_m) dt}{\sqrt{F} \cdot 2 \sqrt{2\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_b}}. \quad (12)$$

Из осциллограммы (рис. 1) видно, что в период времени от $t = 17,5$ до $t = 20$ мсек и $t = 37,5$ до $t = 40$ мсек, благодаря большому обрат-

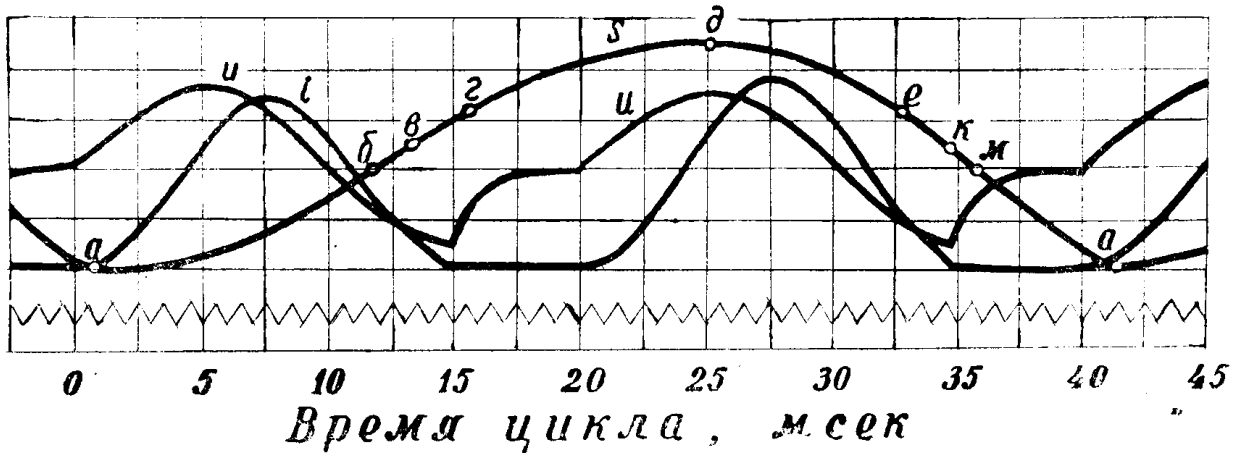


Рис. 1. Осциллограмма рабочего процесса соленоидного молотка со свободным выбегом бойка (S—кривая хода бойка, кривая тока i и напряжения u).

ному сопротивлению вентиля, ток в катушке не протекает и э. д. с., наведенная в катушке, равна нулю, т. е. магнитное поле катушки успевает сворачиваться до момента подхода последующей полуволны напряжения. Состояние схемы в этот период эквивалентно отключению катушки. Поэтому для работы молотка характерным является то, что величина тока и характер его изменения устанавливается сразу с момента включения молотка (если магнитное состояние магнитопровода при включении молотка соответствует магнитному состоянию при его работе в момент начала протекания тока в катушке). Полагаем, что явление отскока отсутствует и в момент включения молотка боек находится у хвостовика рабочего инструмента. Это позволяет, вводя граничные условия, решать уравнение движения бойка по частям, при этом считая

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (13)$$

Подставляя выражение (9—13) в уравнение (8), после некоторых преобразований получаем интегродифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} 4\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_b \frac{dF}{dt} - 2U_m \sin \omega t \sqrt{2\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_b} \cdot \sqrt{F} + 2R\delta_0 F = \\ = \frac{2R}{m} F \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt. \end{aligned} \quad (14)$$

Для упрощения полученного уравнения заменим входящие в него постоянные величины, которые определяются параметрами молотка, следующими коэффициентами:

$$c_1 = 4\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_b ;$$

$$c_2 = 2U_m \sqrt{2\pi\omega^2 \cdot 10^{-7} S_b} ;$$

$$c_3 = 2R\delta_0 ;$$

$$c_4 = \frac{2R}{m}.$$

Тогда уравнение (14) запишется

$$c_1 \frac{dF}{dt} - c_2 \sin \omega t \sqrt{F} + c_3 F = c_4 F \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt. \quad (15)$$

При включении катушки под постоянное напряжение (по аналогии) изменение силы тяги во времени будет описываться уравнением

$$c_1 \frac{dF}{dt} - c_2 \sqrt{F} + c_3 F = c_4 F \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt. \quad (16)$$

Если движущими силами являются только силы, развиваемые катушкой молотка, то до начала движения бойка имеет место равенство $F_m = F$, поэтому при неподвижном бойке выражение, стоящее в правой части уравнений (15, 16), равно нулю

$$c_4 F \int_0^t dt \int_0^t (F - F_m) dt = 0.$$

Для случая застопоренного бойка выражения (15, 16) будут соответственно иметь вид

$$c_1 \frac{dF}{dt} - c_2 \sin \omega t \sqrt{F} + c_3 F = 0 \quad (17)$$

$$c_1 \frac{dF}{dt} - c_2 \sqrt{F} + c_3 F = 0. \quad (18)$$

Решая уравнение (17), получаем

$$F = \left[\frac{c_2 c_3 \sin \omega t - 2c_1 c_2 \cos \omega t + 2c_1 c_2 \omega e^{-\frac{c_3 t}{2c_1}}}{c_3^2 + 4c_1^2 \omega^2} \right]^2.$$

Подставив значения коэффициентов c_1 , c_2 и c_3 и произведя некоторые преобразования, имеем

$$F = \frac{L_0}{2\delta_0} I_m^2 \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{Rt}{L_0}} \right]^2. \quad (19)$$

Для случая включения катушки под постоянное напряжение при застопоренном бойке, решая уравнение (18), получаем

$$F = \frac{c_2^2}{c_3^2} \left(1 - e^{-\frac{c_3 t}{2c_1}} \right)^2.$$

Или, подставляя значения c_1 , c_2 и c_3 , имеем

$$F = \frac{L_0}{2\delta_0} I_y^2 \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L_0}} \right)^2. \quad (20)$$

В выражениях (19), (20)

L_0 — индуктивность катушки при воздушном зазоре δ_0 ;

R — активное сопротивление обмотки;
 $\varphi = \arctg \frac{\omega L_0}{R}$ — угол сдвига между током и напряжением;
 $I_m = \frac{U_m}{Z}$ — амплитудное значение установившегося тока;
 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L_0)^2}$ — полное сопротивление катушки;
 $I_y = \frac{U}{R}$ — установившийся ток катушки.

Формулы (19, 20), для определения изменения силы тяги катушки при включении последней под синусоидальное и постоянное напряжение аналогичны имеющимся в литературе [2, 3]. Это свидетельствует о правильном подходе к выводу уравнений (15, 16).

Сумма сил сопротивления F_m движению бойка может быть функцией пути. Так, при наличии тормозных сил пружины и допуская силы трения постоянными на всем пути движения, имеем

$$F_m = F_{cm} + c_5 \delta,$$

где c_5 — коэффициент жесткости пружины.

В этом случае, исходя из основного уравнения движения бойка,

$$F - (F_{cm} + c_5 \delta) = m \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (21)$$

в уравнениях (15, 16) следует переменную F заменить переменной δ . Тогда после преобразований получаем

$$\begin{aligned}
 c_1 m \frac{d^3 \delta}{dt^3} + c_1 c_5 \frac{d \delta}{dt} - c_2 \sin \omega t \sqrt{m \frac{d^2 \delta}{dt^2} + c_5 \delta + F_{cm}} + \\
 + (c_3 - m c_1 \delta) \left(m \frac{d^2 \delta}{dt^2} + c_5 \delta + F_{cm} \right) = 0.
 \end{aligned} \quad (22)$$

И при включении катушки под постоянное напряжение имеем

$$\begin{aligned}
 c_1 m \frac{d^3 \delta}{dt^3} + c_1 c_5 \frac{d \delta}{dt} - c_2 \sqrt{m \frac{d^2 \delta}{dt^2} + c_5 \delta + F_{cm}} + \\
 + (c_3 - c_1 m \delta) \left(m \frac{d^2 \delta}{dt^2} + c_5 \delta + F_{cm} \right) = 0
 \end{aligned} \quad (23)$$

Уравнения (22) и (23) при принятых допущениях описывают рабочие процессы молотка для случаев, когда катушка молотка включена на синусоидальное (22) и на постоянное напряжение (23). Решение уравнений (22) и (23), сравнение расчетных данных с экспериментальными, а также возможность принятых допущений для каждого конкретного случая будут опубликованы позже.

Определяющим фактором при расчете соленоидного молотка является значение величины и характера изменения электрических параметров соленоидов с изменением воздушного зазора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М., Фролов А. В., Тронов А. П., О параметрах соленоидного молотка со свободным выбегом бойка. Статья опубликована в настоящем сборнике.
2. Буйлов А. Я., Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
3. Бабиков М. А., Электрические аппараты. Госэнергоиздат, 1951.