

УДК 53.01.072:51:771.319.36

ШТОРНЫЕ СВЕТОВЫЕ ЗАТВОРЫ

Б.С.Потапов, Ю.А.Пьянков

Высокоскоростные световые затворы могут быть применены, в частности, для быстрого перекрытия (отсечки) светового пучка в скоростных фотокамерах после окончания регистрации во избежание повторного наложения изображения на пленку [1].

Ранее, в [2] и [3] были описаны принцип действия и математическая модель скоростного ферродинамического светового затвора, приведены его технические характеристики.

В данной работе представлены два новых скоростных световых затвора - магнитоэлектрический и электростатический.

Магнитоэлектрический шторный световой затвор был разработан для перекрытия относительно небольших световых отверстий в приборах. Цель разработки - уменьшение габаритов и веса затвора по сравнению с его ферродинамическим аналогом при сохранении присущих последнему высоких скоростных характеристик. По принципу действия и многим элементам конструкции магнитоэлектрический и ферродинамический затворы одинаковы, за исключением магнитной системы. Массивный стальной магнитопровод ферродинамического затвора заменен в магнитоэлектрическом затворе на сильный постоянный магнит (или магниты) типа самарий-кобальтовых, имеющих при относительно небольших габаритах высокую остаточную индукцию.

Основными узлами магнитоэлектрического затвора являются магнитная система с постоянным магнитом (или магнитами) и све-

топерекрывающая пластина-шторка, на которой расположена печатная катушка индуктивности прямоугольной формы. При разряде конденсатора источника электропитания через печатную катушку происходит электромагнитное взаимодействие тока в ней с магнитным полем в рабочем воздушном зазоре магнитной системы. Под воздействием электромагнитной силы шторка перемещается в своей плоскости, перекрывая оптический канал прибора.

На рис.1 схематично изображено расположение шторки 1 с печатной катушкой индуктивности 2 в воздушном зазоре магнитной системы, образованном полюсами постоянного магнита, показано направление движения шторки (ось ox).

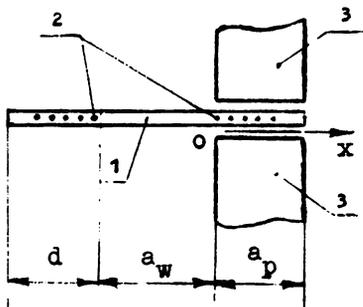


Рис.1

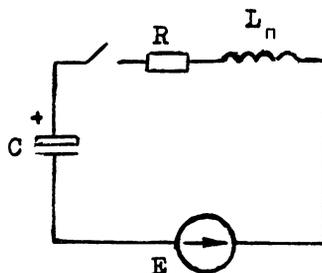


Рис.2

Для наших целей важнейшим показателем затвора является его время срабатывания. Поэтому важны его динамические характеристики, к которым относятся зависимости $i = i(t)$, $x = x(t)$, $v = v(t)$ и др.

Для составления дифференциальных уравнений математической модели на рис.2 приведена эквивалентная электрическая схема магнитоэлектрического затвора.

Используются следующие обозначения:

C - емкость конденсатора,

- R - активное сопротивление разрядной цепи;
 L_n - индуктивность печатной катушки;
 U_c - напряжение на конденсаторе;
 U_{c0} - начальное напряжение на конденсаторе;
 E - э.д.с. движения;
 x - перемещение шторки;
 $w_n(x)$ - число витков печатной катушки, находящихся в зазоре магнитной системы;
 k_z - коэффициент заполнения медью подвижной катушки;
 B - магнитная индукция в воздушном зазоре магнитной системы;
 a_p - разгонный участок (длина воздушного зазора);
 l_m - ширина полюса магнита;
 l_n - средняя длина проводников печатной катушки, находящихся в воздушном зазоре;
 d - ширина "намотки" печатной катушки;
 i - ток в разрядной цепи;
 m - масса шторки;
 t - время.

Динамика магнитоэлектрического затвора описывается следующими дифференциальными уравнениями.

1. Уравнением баланса напряжений в эквивалентной электрической схеме:

$$U_c + iR + L_n \frac{di}{dt} - E = 0 .$$

2. Уравнением баланса сил, действующих на шторку:

$$-k_z l_n w_n(x) B i = m \frac{d^2 x}{dt^2} .$$

3. Уравнением для э.д.с. движения, наводимой в печатной катушке индуктивности при перемещении шторки в воздушном зазоре:

$$E = k_z l_n w_n(x) B \frac{dx}{dt} .$$

Добавляя уравнение

$$i = C \frac{dU_c}{dt} ,$$

получаем систему дифференциальных уравнений:

$$U_c + iR + L_n \frac{di}{dt} - E = 0 ,$$

$$i = C \frac{dU_c}{dt} ,$$

$$E = k_z l_n w_n(x) B \frac{dx}{dt} ,$$

$$-k_z l_n w_n(x) B i = m \frac{d^2 x}{dt^2} .$$

Начальные условия: при $t = 0$ $U_c = U_{c0}$, $i = 0$, $x = x_0$,
 $\frac{dx}{dt} = 0$.

Для проведения численного интегрирования на ЭВМ эта система дифференциальных уравнений приводится к виду, разрешенному относительно первых производных.

Расчеты динамических характеристик магнитоэлектрического затвора, проведенные В.К.Королевым по разработанной им программе интегрирования, дали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

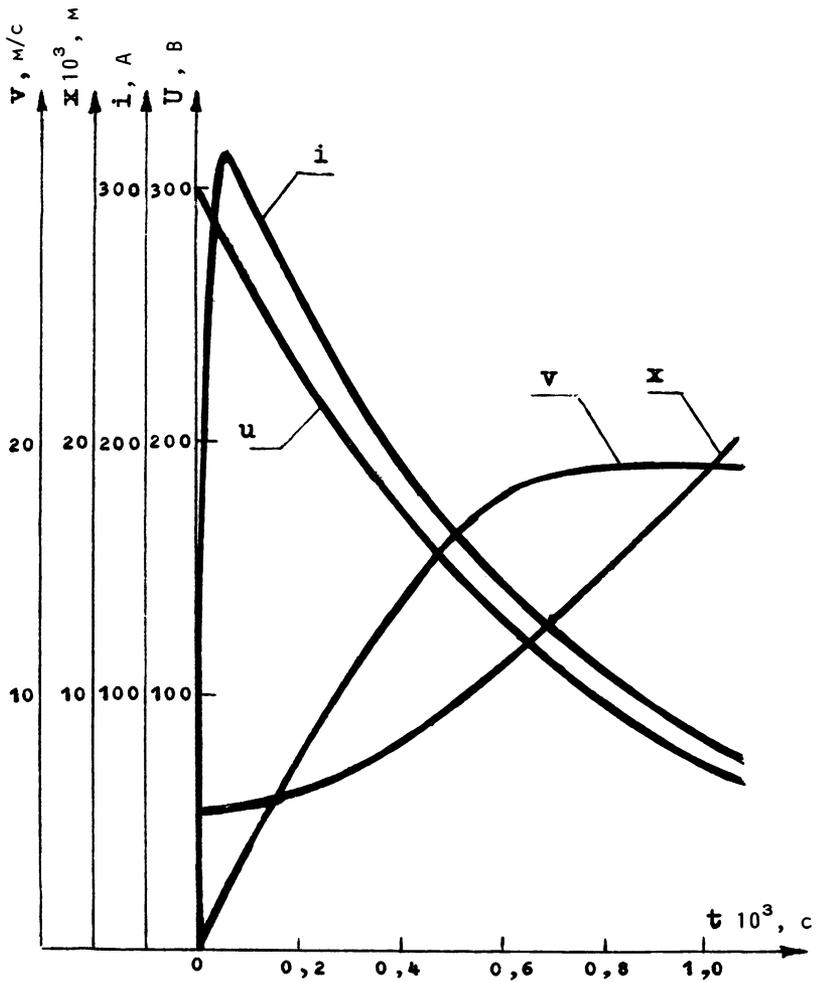


Рис. 3. Расчетные динамические характеристики магнитоэлектрического затвора

Так, времена перекрытия светового пучка подвижной шторкой, рассчитанные по приведенной модели и измеренные экспериментально, отличаются менее чем на 10%.

Для примера на рис.3 показан характер изменения расчетных динамических характеристик магнитоэлектрического затвора для следующего набора его параметров: $U_{CO} = 300$ В, $X_0 = 0,0053$ м, $C = 0,00077$ Ф, $R = 0,9$ Ом, $L_n = 0,000008$ Гн, $m = 0,0013$ кг, $d = 0,0053$ м, $a_p = 0,01$ м, $l_n = 0,024$ м, $l_m = 0,03$ м, $w_n = 14$, $a_w = 0,015$ м, $k_z = 0,66$, $B = 0,7$ Тл, $x = 0,015$ м.

Электростатический шторный световой затвор - это скоростной затвор с малыми энергопотреблением и весом, с большой гибкостью при компоновке.

Основой затвора является конденсатор, одна из обкладок которого подвижна и может перемещаться под действием электростатических сил в пространстве. В емкостной структуре, в которой гибкая пленочная подвижная обкладка при своем перемещении (под действием разности потенциалов) непрерывно контактирует с неподвижной (накатывается на нее), реализуются значительные перемещения [4].

Принципиальная схема электростатического затвора показана на рис.4. Здесь: 1 - корпус прибора с торцевым оптическим каналом. Вдоль боковых граней корпуса расположены стойки, на которых размещены тяговые (управляющие) электроды 2,2' и контактные площадки 3,3', гальванически с электродами не связанные. 4 - односторонне металлизированная полиэтилентерефталатная (лавсановая) лента толщиной $\Delta = 4$ мкм со светопрозрачным участком. Концы ленты закреплены в плоскости тяговых электродов так, что диэлектрическая сторона ленты оказывается цилиндрически прижатой (по ширине ленты) к поверхности тяговых электродов. Электрический контакт слоя металлизации ленты с контактными площадками осуществлен через прокладку из проводящей ре-

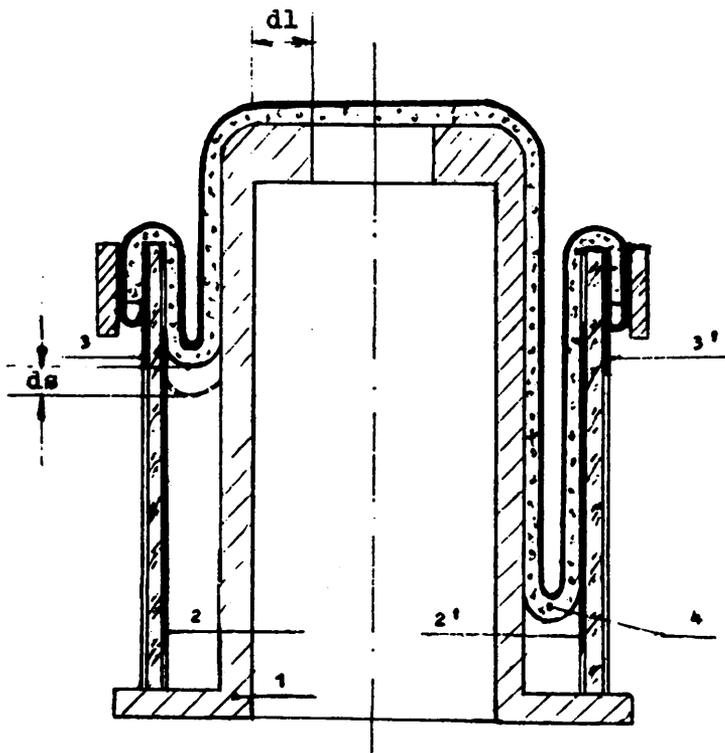


Рис. 4

зины. Рабочее напряжение подается на контактные площадки и электроды. Для движения ленты влево оно должно быть подано на электрод 2 и площадку 3(3'), причем электрод 2' в этот момент должен быть эквипотенциален с площадками 3(3'). При движении вправо эквипотенциальными должны стать контактные площадки и электрод 2, а рабочее напряжение должно быть приложено к электроду 2'.

Оценим скорость перемещения ленты в электростатическом затворе.

При перемещении ленты фрикционно взаимодействует с корпусом прибора. Сила трения ленты, переброшенной через два неподвижных блока, может быть оценена, согласно формуле Эйлера, для одного блока как $F_{\text{тр.}} = \frac{mg}{2} e^{\mu\pi/2}$, где $m = \gamma\Delta L$ - масса на единицу ширины ленты, γ - плотность лавсана, L - длина ленты (без "технологических" участков закрепления), g - ускорение свободного падения. Будем считать, что форма ленточной петли у электрода образуется частью кругового цилиндра радиуса R . Тогда изгибной момент (на единицу ширины ленты) может быть записан как $M = \frac{EI}{R}$, где $E = 3 \cdot 10^9$ Н/м - модуль Юнга лавсана, $I = \Delta^3/12$ - момент инерции поперечного сечения ленты (на единицу ширины ленты).

При накатывании ленты на электрод на величину ds прозрачный участок в ленте переместится на dl , причем $dl = 2ds$, что легко видеть из рис.4. Этот же результат получится, если воспользоваться зависимостью $dl = (1 - \cos \alpha)ds$, учтя, что α - асимптотический угол между плоскостью электрода и "свободным" концом ленты равен 180° .

Имеем уравнение баланса сил (на единицу ширины ленты):

$$\frac{\epsilon\epsilon_0 U^2}{2\Delta(1-\cos\alpha)} = ma + 2 \frac{mg}{2} e^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}} + 2 \frac{E\Delta^3}{12R^2(1-\cos\alpha)},$$

где a - ускорение ленты, $\epsilon = 3$ - относительная диэлектрическая постоянная лавсана.

Для $\alpha = 180^\circ$ будем иметь

$$\frac{\epsilon\epsilon_0 U^2}{2\Delta^2} = \gamma\Delta La + \gamma\Delta Lge^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}} + \frac{E\Delta^3}{3D^2},$$

где D - диаметр цилиндрической части петли.

Учитывая, что лента под воздействием постоянной силы движется равноускоренно, определим скорость ее перемещения, используя приведенное уравнение и уравнение $s = \frac{at^2}{2}$.

Для набора параметров: $U = 250$ В, $C_p = 0,7 C_T$ - реальная емкость, $L = 15 \cdot 10^{-2}$ м, $\Delta = 4 \cdot 10^{-6}$ м, $\mu = 0,16$ - коэффициент трения, $D = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\gamma = 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³, перемещение ленты $dl = 20 \cdot 10^{-3}$ м получим скорость движения ленты - 1,6 м/с.

Таким образом, электростатический световой затвор, значительно уступая ферродинамическому и магнитоэлектрическому затворам по быстрдействию, имеет существенно меньшее энергопотребление и вес.

Л и т е р а т у р а

1. ДУБОВИК А.С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов.-М.: Наука,1984.- 320 с.

2. Математическая модель шторного светового затвора /Пьянков Ю.А., Фадеев С.И., Королев В.К. и др.// Моделирование в пленочной электромеханике.-Новосибирск,1985.- Вып.110: Вычислительные системы.-С.47-51.

3. ПЬАНКОВ Ю.А., КОРОЛЕВ В.К. Моделирование и оптимизация параметров ферродинамического светового затвора// Моделирование в пленочной электромеханике.- Новосибирск,1989.- Вып.131: Вычислительные системы.-С.60-70.

4. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок // Моделирование в пленочной электромеханике.-Новосибирск, 1981.- Вып.84: Вычислительные системы.- С.33-53.

Поступила в ред.-изд.отд.

15 ноября 1991 года