

УДК 519.688:771.319.36

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШТОРНОГО СВЕТОВОГО ЗАТВОРА

Д.А.Пьянков, С.И.Фадеев, В.К.Королев, Н.Н.Павлов

При фотографической регистрации быстротекущих процессов важную роль играют световые затворы, применяемые в высокоскоростных фотокамерах [1]. В частности, для быстрого перекрытия (отсечки) светового пучка в приборе после окончания регистрации применяются шторные световые затворы.

Основным показателем работы любого быстродействующего затвора является его время срабатывания, т.е. время, необходимое для перекрытия светового отверстия в приборе. Поэтому важно знать динамические характеристики затвора, к которым относятся зависимости $x = x(t)$, $i = i(t)$, $\phi = \phi(t)$ и др. (см. ниже).

В работе сформулирована и решена на ЭВМ математическая модель динамики шторного светового затвора, принцип действия которого основан на перемещении рамки с током в магнитном поле [1].

Основными узлами затвора являются неразветвленный шихтованный магнитопровод с плоским воздушным зазором, образованным полюсными наконечниками, и светоперекрывающая пластинка-шторка, на которой расположена плоская катушка индуктивности прямоугольной формы. На магнитопроводе размещена неподвижная катушка индуктивности, соединенная последовательно с подвижной плоской катушкой.

В исходном состоянии шторка расположена таким образом, что одна сторона прямоугольной катушки индуктивности находится в воздушном зазоре между полюсными наконечниками. При разряде конденсатора через неподвижную и подвижную катушки индуктивности происходит электромагнитное взаимодействие тока в подвижной катушке с магнитным полем в воздушном зазоре магнитопровода. Под воздействием электромагнитной силы шторка, перемещаясь в своей плоскости,

вылетает из зазора и перекрывает световое отверстие.

На рис.1 схематично изображены шторка 1 с подвижной катушкой индуктивности 2 и полюсные наконечники магнитопровода 3, показано направление движения шторки (ось X).

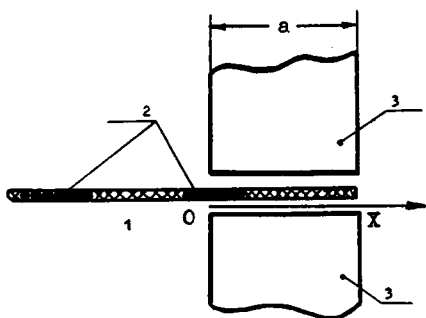


Рис.1

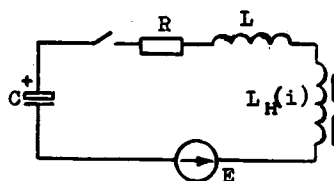


Рис. 2

На рис.2 приведена эквивалентная электрическая схема светового затвора. При описании динамики затвора сделано несколько допущений: отсутствуют потоки рассеяния в магнитопроводе, пренебрежимо малы вихревые токи и гистерезис, нет изменения намагниченности полюсных наконечников под воздействием перемещаемой катушки, отсутствуют противодействующие силы типа сил трения. При этих допущениях для описания динамики затвора справедливы следующие дифференциальные уравнения.

1. Уравнение баланса напряжений в эквивалентной электрической схеме

$$U_C + iR + L \frac{di}{dt} + \frac{d\phi}{dt} - E = 0,$$

где U_C - напряжение на конденсаторе, i - ток в цепи, R - активное сопротивление катушек индуктивности и внутреннее сопротивление конденсатора, L - индуктивность подвижной катушки, ϕ - потокосцепление неподвижной катушки, E - Э.д.с. движения, t - время.

2. Уравнение баланса сил

$$-klW(x)B_1 = m \frac{d^2x}{dt^2},$$

где k - коэффициент заполнения медью подвижной катушки, l - длина стороны подвижной катушки, $W(x)$ - число витков подвижной катушки, находящихся в зазоре, B - магнитная индукция в воздушном зазоре.

зоре магнитопровода, m - масса якоря, x - перемещение якоря.

3. Уравнение для э.д.с. движения, наводимой в подвижной катушке индуктивности при перемещении якоря

$$E = k l W(x) B \frac{dx}{dt}.$$

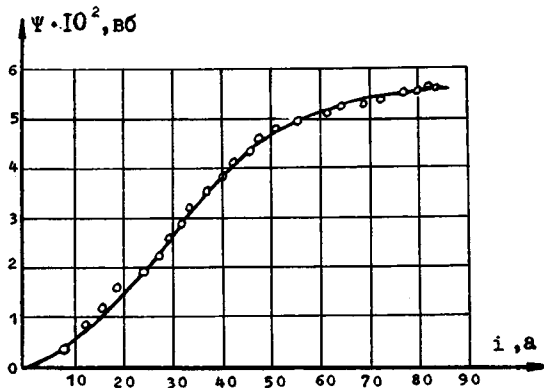


Рис.3

Зависимость $\psi = \psi(i)$ задана в виде экспериментальной кривой, представленной на рис.3. Кроме того, используются дополнительные соотношения:

$$\psi = \Phi W_H = B S W_H,$$

$$S = a l_M,$$

где Φ - магнитный поток через

воздушный зазор, W_H - число витков неподвижной катушки индуктивности, S - площадь поперечного сечения магнитопровода, a - длина воздушного зазора, l_M - ширина магнитопровода.

Представляя в первом уравнении $\frac{d\psi}{dt}$ в виде $\frac{d\psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}$ и добавляя уравнение $i = C \frac{dU_C}{dt}$ (C - емкость конденсатора), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$U_C + iR + \left(L + \frac{d\psi}{di} \right) \frac{di}{dt} - E = 0,$$

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

$$E = k l W(x) B \frac{dx}{dt},$$

$$-k l W(x) B i = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

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:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_C}{dt} &= \frac{1}{C}, \\ \frac{di}{dt} &= - \frac{U_C + iR - \tilde{W}(x)\phi V}{L + \frac{d\phi}{di}}, \\ \frac{dx}{dt} &= V, \\ \frac{dV}{dt} &= - \frac{\tilde{W}(x)\phi i}{m}. \end{aligned} \right\}$$

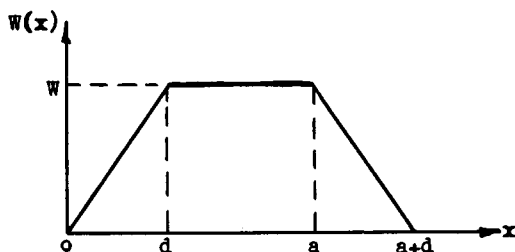


Рис.4

Функция $W(x)$, фигурирующая в исходных уравнениях, имеет вид трапеции, показанной на рис.4 (W — число витков подвижной катушки, d — ширина ее намотки). Предполагается, что координата x (перемещение правого края

подвижной катушки) отсчитывается от левого края полюсного наконечника (см.рис.1).

В преобразованном виде функция $\tilde{W}(x)$ имеет вид:

$$\tilde{W}(x) = \begin{cases} \frac{b}{d} x, & 0 \leq x < d, \\ b, & d \leq x < a, \\ b(1 - \frac{x-a}{d}), & a \leq x < a+d, \\ 0, & a+d \leq x. \end{cases}$$

Здесь $b = \frac{k l W}{a l_M W_H}$.

Экспериментальная зависимость $\phi = \phi(i)$ обрабатывалась с помощью сглаживания сплайнами по методике, описанной в [2].

Система дифференциальных уравнений интегрировалась методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом.

Расчеты динамических характеристик светового затвора, проведенные на основе принятой модели, дали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Так, времена перекрытия светового пучка при перемещении шторки на $(15-40) \cdot 10^{-8}$ м, рассчитанные на основе модели и измеренные экспериментально, отличаются менее чем на 10%.

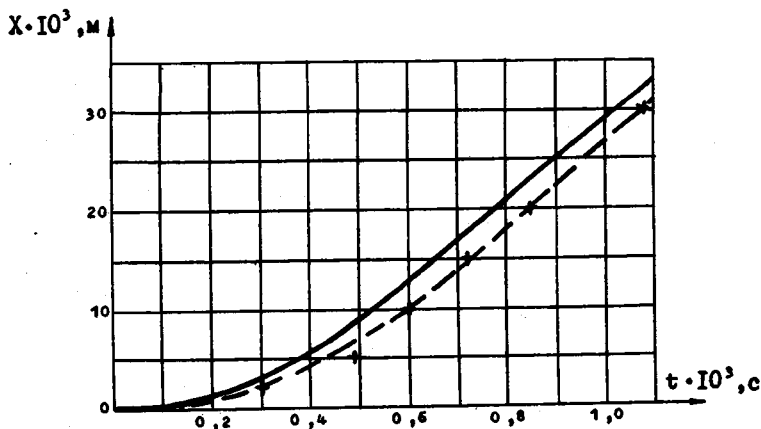


Рис. 5

Для примера на рис.5 приведены расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (штриховая линия) зависимости $x = x(t)$.

В заключение авторы выражают благодарность В.Л.Дятлову за участие в обсуждении модели и Б.С.Поталову за участие в обсуждении модели и помощь в проведении эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. ДУБОВИК А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. - М.: Наука, 1984. - 320 с.
2. ПАВЛОВ Н.Н. Сглаживание кубическими сплайнами и метод штрафов. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 98). Новосибирск, 1983, с.92-102.

Поступила в ред.-изд.отд.
8 августа 1985 года