

УДК 519.688:771.319.36

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ФЕРРОДИНАМИЧЕСКОГО СВЕТОВОГО ЗАТВОРА

Ю.А.Пьянков, В.К.Королев

Описание конструкции ферродинамического светового затвора, принцип его функционирования и дифференциальные уравнения математической модели приведены в работе [1].

Основное внимание в данной работе уделяется достижению наилучших характеристик при инженерном проектировании ферродинамического светового затвора. При этом в описании математической модели его учитывается тормозящий эффект, возникающий под воздействием задних проводников подвижной катушки на движение шторки затвора.

На рис. 1а схематично изображены шторка 1 с подвижной катушкой индуктивности 2 и полюса магнитопровода 3. На рис. 1б приведена эквивалентная электрическая схема затвора.

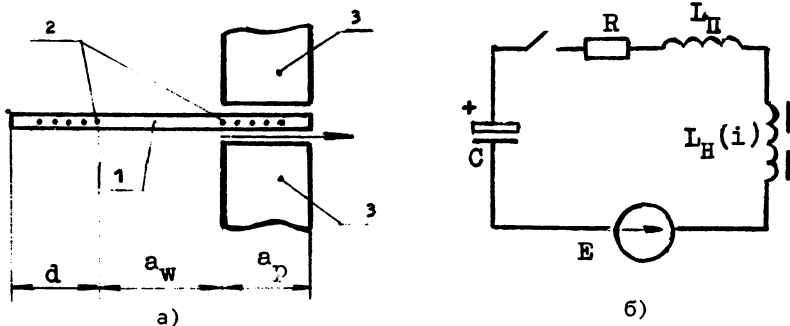


Рис. 1

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику ферродинамического затвора, имеет вид:

$$U_0 + iR + \left( L_n + \frac{d\phi}{dt} \right) \frac{di}{dt} - E = 0,$$

$$i = C \frac{dU_0}{dt},$$

$$E = k_3 l_n w_n(x) B \frac{dx}{dt},$$

$$-k_3 l_n w_n(x) B i = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Дополнительные соотношения:  $\phi = BS w_n$ ,  $S = a_p l_m$ .

Функция  $w_n(x)$  изображена на рис.5 справа. Первое уравнение - это уравнение баланса напряжений в эквивалентной электрической схеме, второе - выражает зависимость между током и напряжением на конденсаторе, третье - это уравнение для э.д.с. движения, наводимой в подвижной катушке при перемещении шторки, четвертое - уравнение баланса сил.

В приведенных формулах используются следующие обозначения:

$C$  - емкость конденсатора;

$R$  - активное сопротивление разрядной цепи;

$L_n$  - индуктивность собственная подвижной катушки;

$L_n(i)$  - индуктивность неподвижной катушки с магнитопроводом;

$U_0$  - напряжение на конденсаторе;

$U_{c0}$  - начальное напряжение на конденсаторе;

$i$  - ток в разрядной цепи;

$E$  - э.д.с. движения;

$x$  - перемещение шторки;

$t$  - время;

$w_n(x)$  - число проводников подвижной катушки, находящихся в воздушном зазоре магнитопровода;

$k_3$  - коэффициент заполнения медью подвижной катушки;  
 $w_n$  - число витков неподвижной катушки;  
 $\phi$  - потокосцепление неподвижной катушки;  
 $B$  - магнитная индукция в воздушном зазоре магнитопровода;  
 $a_p$  - длина воздушного зазора (разгонный участок);  
 $l_m$  - ширина магнитопровода;  
 $l_n$  - средняя длина проводника подвижной катушки индуктивности, находящегося в воздушном зазоре;  
 $d$  - ширина намотки подвижной катушки;  
 $a_w$  - расстояние между передними и задними проводниками подвижной катушки;  
 $m$  - масса шторки;  
 $F$  - электромагнитная сила, действующая на подвижную катушку индуктивности;  
 $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Начальные условия для системы уравнений:

$$\text{при } t = 0, \quad i = 0, \quad U_c = U_{c0}, \quad x = x_0, \quad \frac{dx}{dt} = 0.$$

При решении оптимизационной задачи, когда численное интегрирование системы уравнений приходится проводить десятки (а может быть, и сотни) раз, лимитирующим фактором может явиться машинное время счета. Отсюда появляется необходимость упрощения математической модели. В нашем случае излишне расточительным оказывается описание экспериментальной зависимости потокосцепления  $\phi$  от тока  $i$  с помощью сглаживающих сплайнов. Вполне достаточным оказалось описание зависимости  $\phi(i)$  с помощью кусочно-линейной функции, состоящей из четырех звеньев:  $\phi = \phi_k + D_k(i - i_k)$ ,  $k = 0, 1, 2, 3$ . Геометрический (и физический) смысл величин  $D_k$ ,  $\phi_k$  и  $i_k$  очевиден. На рис. 2 показана кусочно-линейная аппроксимация зависимости  $\phi(i)$ .

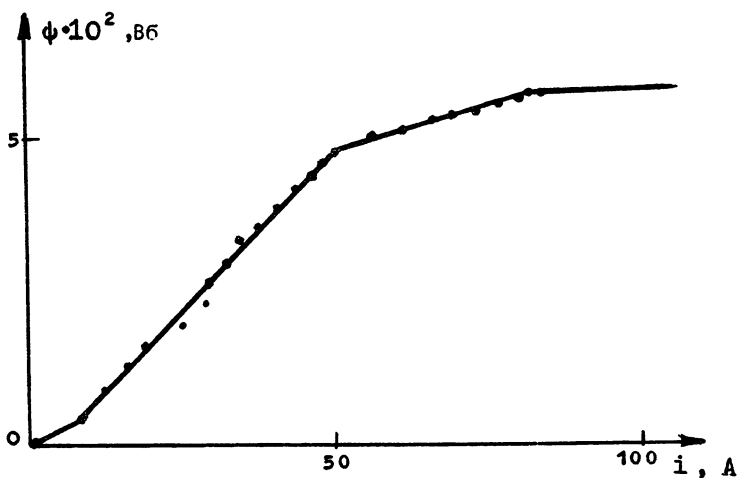


Рис. 2

На рис.3 приведены результаты счета одного из вариантов модели затвора по полной (со сглаживающими сплайнами) и упрощенной (с кусочно-линейной аппроксимацией) системе.

Оптимизируемыми (варьируемыми) параметрами могут быть все параметры, участвующие в математическом описании затвора. Каждый из них задается в некоторых границах. Если какой-либо из параметров фиксирован, то границы задаются совпадающими с его исходным значением. Поскольку основным показателем работы любого быстродействующего затвора является его время срабатывания, то ставится задача минимизировать это время, т.е. время, за которое шторка переместится на заданное расстояние  $X_R$ . Другими словами, нужно отыскать такие значения варьируемых параметров устройства, которые при наложенных ограничениях дадут минимум целевой функции - минимум времени срабатывания.

Таким образом, функционал оптимизационной задачи определяется численно в результате интегрирования системы обыкновен-

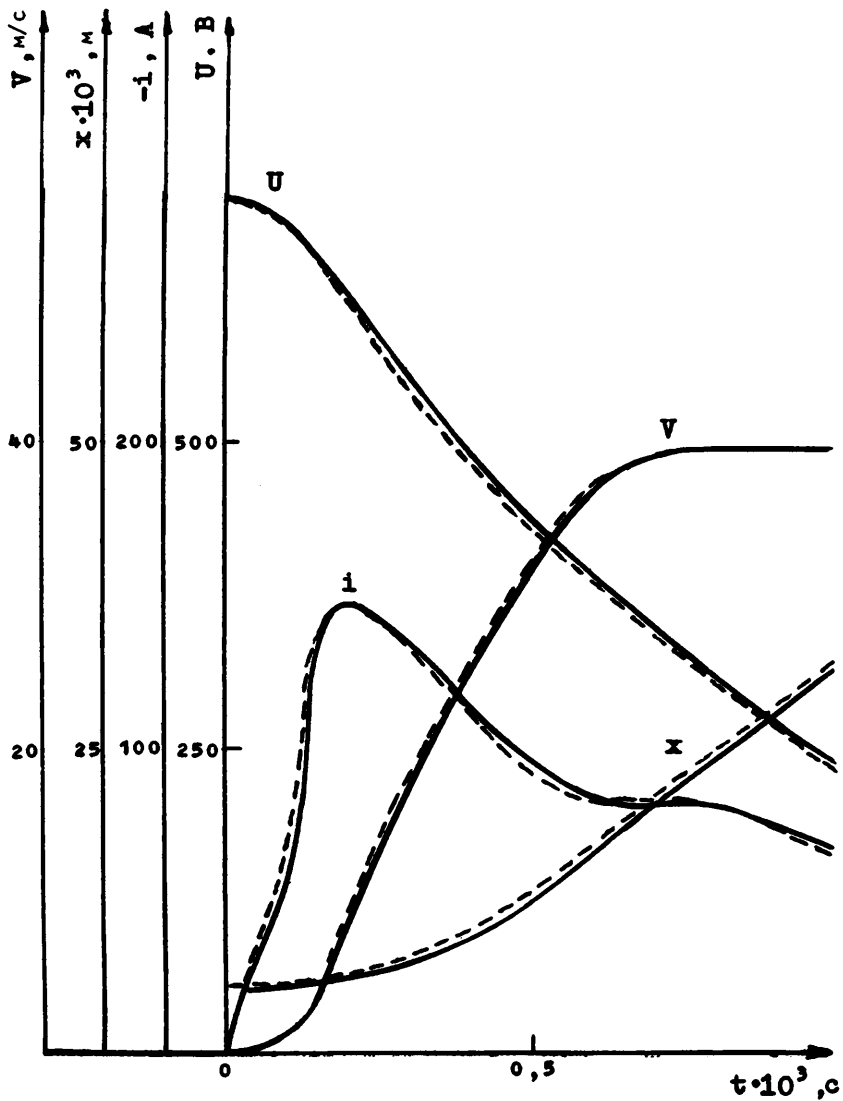


Рис. 3. Расчетные кривые при сплайновой (сплошная линия) и кусочно-линейной (пунктир) аппроксимациях  $\psi(i)$

ных дифференциальных уравнений; ограничения на оптимизируемые параметры двусторонние.

В настоящее время разработано достаточное количество как численных методов решения задач оптимизации, так и реализующих их программ для ЭВМ. Следует, однако, заметить, что методы оптимизации обоснованы лишь для "хорошо поставленных" задач, таких, как задачи линейного, квадратичного, выпуклого программирования. В тех же случаях (как и в нашей задаче), когда целевая функция определяется только численно, нет возможности обоснованно утверждать о преимуществах того или иного метода оптимизации. Затраты на изучение задачи, т.е. на выявление тех или иных свойств целевой функции, соизмеримы с затратами на получение конкретного результата (например, некоторого локального оптимума).

При решении задачи оптимизации параметров ферродинамического затвора применялся метод локальных вариаций (см. например, [2]) как один из наиболее простых и наглядных. При его реализации не требуется вычислять производные целевой функции, как в градиентных методах.

Идея этого метода состоит в следующем. Зафиксируем все варьируемые параметры, кроме одного, выберем некоторый шаг для изменяемого параметра и будем его увеличивать с этим шагом, вычисляя каждый раз значение целевой функции. Если первое же увеличение параметра не улучшает целевую функцию, то станем этот параметр уменьшать. Процесс продолжаем до тех пор, пока целевая функция не ухудшится. После этого фиксируем данный параметр и переходим к изменению следующего. После того как все параметры будут перебраны, возвращаемся к первому и пробуем его изменять с уменьшенным шагом, следя за изменением целевой функции. Конец всего этого процесса определяется либо тем, что целевую функцию уже не удастся заметно улучшить, либо тем, что

шаг изменения параметров стал слишком мелким. Поскольку решается задача с ограничениями, то при каждом очередном изменении параметра производится проверка на его допустимость.

Т а б л и ц а

Электрические и конструктивные параметры  
ферродинамического светового затвора

Параметр	Значение			
	Исходное	Г р а н и ч н о е		Оптимальное
		Нижнее	Верхнее	
$U_{co}, В$	800	600	1000	800
$C, мкФ$	0,0002	0,0001	0,0003	0,0003
$r, Ом$	2,3	2	3	2,029
$L_n, мкГн$	0,000065	0,00005	0,0001	0,00005146
$m, кг$	0,0052	0,005	0,006	0,005029
$x_o, м$	0,0078			
$d, м$	0,0078			
$a_p, м$	0,015			
$l_n, м$	0,092			
$l_m, м$	0,1			
$w_n$	20			
$w_n$	20			
$a_w, м$	0,03			
$k_z$	0,77			

Результаты решения задачи оптимизации представлены графически на рис.4, где изображены исходные и оптимальные кривые фазовых координат системы. В таблице приведены исходные значения, границы изменения и оптимальные значения пяти варьируемых параметров для одного из вариантов затвора. Из таблицы видно, что исходное значение для  $U_{co}$  оказалось оптимальным, пара -

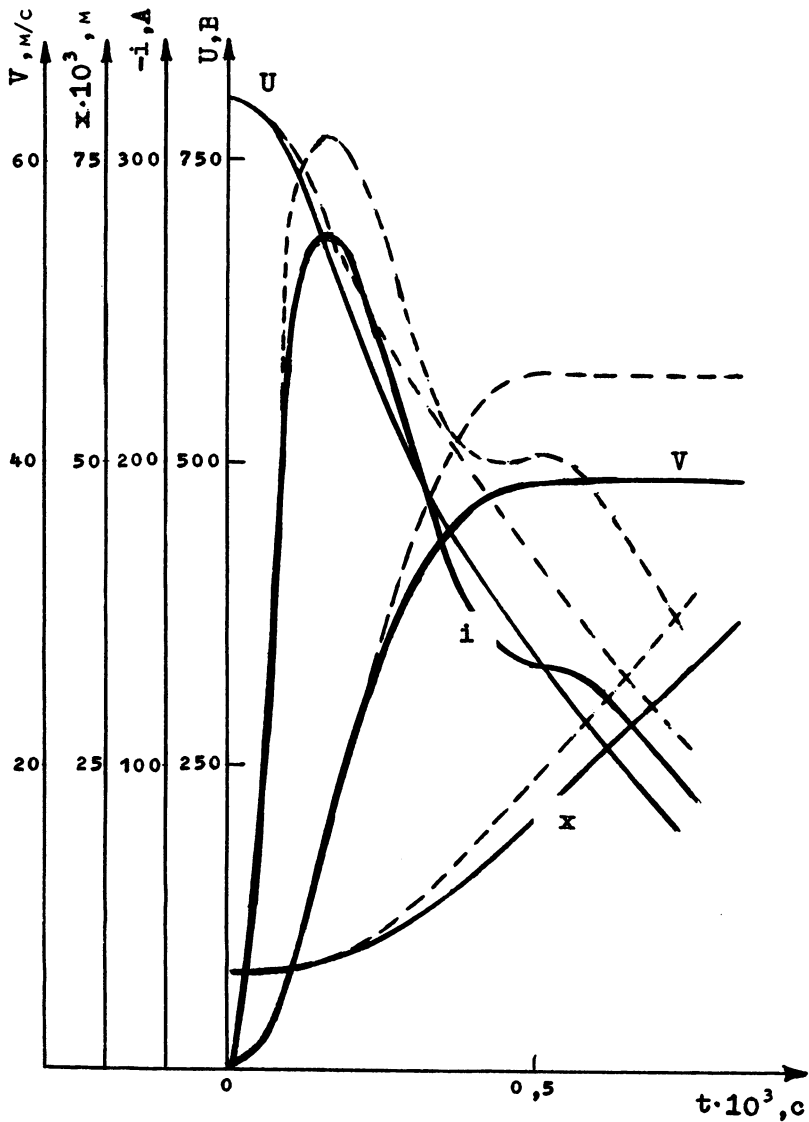


Рис. 4. Расчетные кривые для исходных (сплошная линия) и оптимальных (пунктир) значений параметров



метр  $C$  вышел на свою верхнюю границу, по трем остальным параметрам ( $r$ ,  $L_n$  и  $M$ ) оптимум внутренний.

Рассмотрим, как влияют задние проводники катушки индуктивности на движение шторки затвора. Воздействие магнитного поля в зазоре на передние проводники подвижной катушки описывается функцией  $w(x)$  (см. [1]), имеющей вид трапецевидного горба. При движении шторки задние проводники катушки, попадая в зазор, порождают точно такой же горб  $w(x)$ , но с обратным знаком, поскольку в этих проводниках ток имеет другое направление. Расстояние между этими двумя горбами в точности равно расстоянию между передними и задними проводниками подвижной катушки.

На рис.5 приведены кривые фазовых координат и действующей силы  $F$ , рассчитанные с помощью системы уравнений, учитывающей влияние задних проводников. Расчет приведен для случая  $a_w > d$ , т.е. для относительно больших перемещений шторки.

Торможение шторки затвора за счет задних проводников катушки при больших скоростях движения имеет принципиальное значение для надежности работы устройства, так как способствует гашению скорости и тем самым резко снижает деформацию шторки при останове, предотвращая ее разрушение.

На рис.5 справа показана функция  $w_n(x)$ , от ее характерных точек проведены горизонтальные прямые до пересечения с кривой  $x(t)$  и от нее - до оси абсцисс. Такое построение позволяет более наглядно представить динамику процесса срабатывания затвора (в частности, сопоставить участки нулевой и отрицательной сил).

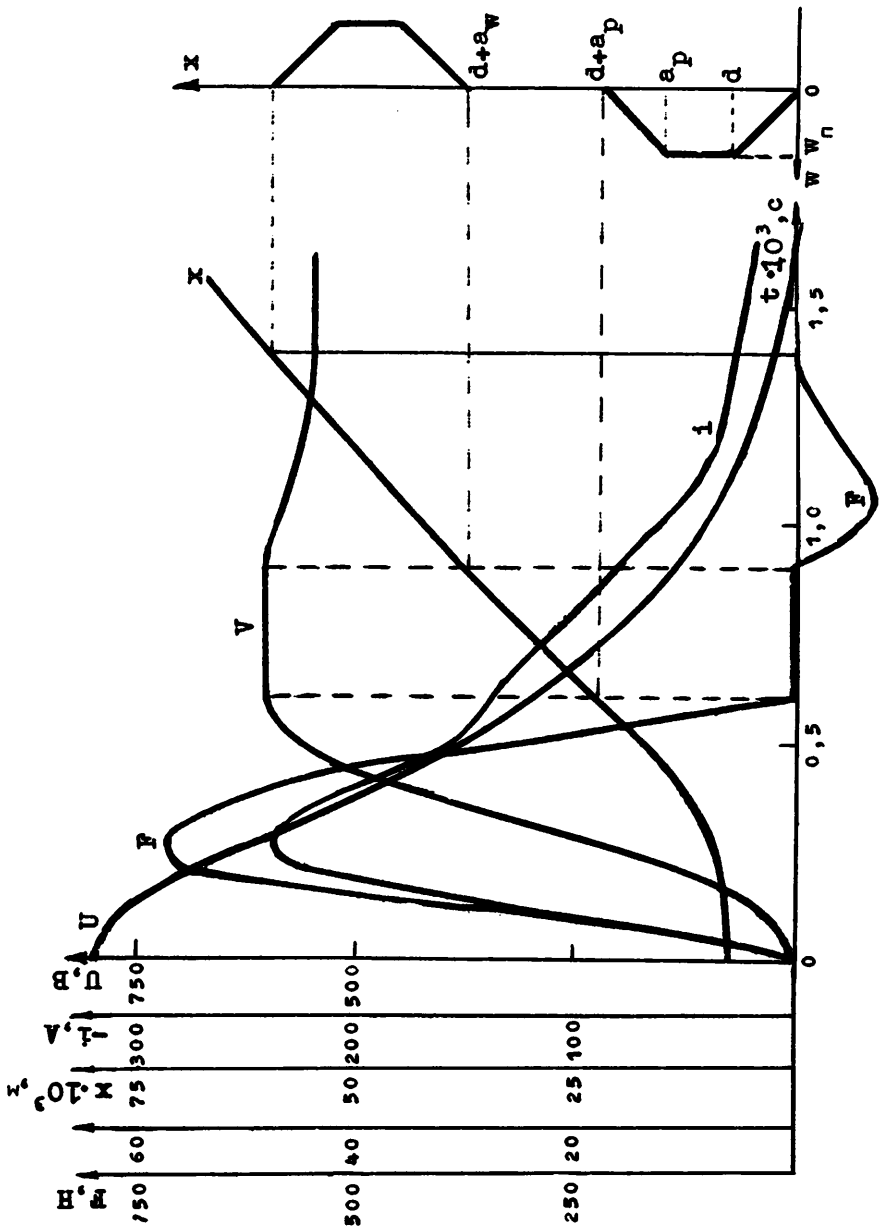


Рис. 5. Расчетные кривые при полном движении катушки индуктивности

## Л и т е р а т у р а

1. ПЬЯНКОВ Ю.А., ФАДЕЕВ С.И., КОРОЛЕВ В.К., ПАВЛОВ Н.Н. Математическая модель шторного светового затвора //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1985.-Вып.110: Вычислительные системы. -С. 47-51.

2. ПОЛАК Э. Численные методы оптимизации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1974. - 376 с.

Поступила в ред.-изд.отд.

1 сентября 1989 года