

С.П. Осипов, М.Ю. Попов, Р.В. Федяев, А.А. Косач
(Томский государственный архитектурно-строительный университет;
e-mail: osip1809@rambler.ru)

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ ЛИФТОВ И ПОДЪЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

Доказана возможность измерений параметров торможения лифтов и подъёмников (перемещения, скорости, ускорения) на основе анализа потока фотоизображений. Предлагаемый способ может быть использован для повышения безопасности и долговечности лифтов и подъёмников.

Ключевые слова: лифты, расстояние, скорость, ускорение, полутоновое изображение, метод проекций.

S.P. Osipov, M.Ju. Popov, R.V. Fedyaev, A.A. Kosach **THE METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF INHIBITION OF LIFTS AND ELEVATORS BY ANALYZING THE FLOW OF PHOTOGRAPHIC IMAGES**

Proved possible to measure the parameters of inhibition of lifts and elevators (displacement, velocity, acceleration) based on flow analysis of photographic images. The proposed method can be used to enhance the safety and reliability of elevators and lifts.

Key words: lifts, distance, speed, acceleration, halftoning image, the method of projections.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 26 апреля 2011 г.

Безопасность лифтов и подъёмников существенным образом зависит от параметров, характеризующих процесс торможения – перемещения, скорости и ускорения [1]. Информация о временном изменении параметров торможения в процессе эксплуатации лифтов и подъёмников необходима для анализа текущего технического состояния лифтов. В настоящее время для определения параметров движения лифта применяются различные датчики ускорений, наибольшее распространение получили пьезоэлектрические акселерометры [2]. Исходя из начальных условий, по временному распределению ускорения рассчитываются значения скорости и перемещения лифта. Одновременное измерение всех трёх параметров в режиме реального времени является актуальной задачей. В науке и технике для измерения параметров движения перемещающихся объектов широко применяются различные оптические методы. Наиболее применяемым является метод, связанный с измерением времени прохождения оптического излучения от источника-регистратора до объекта и обратно. Другим методом является оптический метод измерения дальности, основанный на анализе последовательных фотоизображений объекта [3]. Известно, что перемещение объекта относительно неподвижной плоскости изображения приводит к изменению размеров проекции объекта на плоскость изображения (метод проекций [4]). В литературе недостаточно данных по оценке возможности применения метода проекций, основанного на анализе последовательности фото-

графических изображений, для измерения параметров торможения лифтов и подъемников.

В исследуемом методе по измеренной площади некоторого плоского объекта (оптического маяка), связанного с перемещающимся объектом, оцениваются параметры торможения лифта. Для реализации анализируемого оптического метода необходима быстродействующая фотокамера, которая закреплена на неподвижной части лифтовой шахты. На нижней части лифтовой кабины расположен оптический маяк. Оптический маяк представляет собой плоскую симметричную фигуру, например, квадрат. Для наибольшего оптического контраста целесообразно центральную часть маяка покрасить белой матовой краской, а граничную полосу – чёрной (темной) матовой краской. Для получения качественного изображения маяк должен подсвечиваться источником светового излучения, причём он должен быть связан с перемещающимся объектом. На рис. 1 приведена геометрическая схема формирования изображения оптического маяка: 1 – оптический маяк, 2 – источник света; 3 – фотокамера; 4 – фотоматрица (плоскость изображения). Для квадратного маяка геометрическая схема характеризуется следующими параметрами: размером контрастной части маяка – A ; размером маяка – B ; расстоянием от маяка до центра объектива фотокамеры – F ; расстоянием от центра объектива фотокамеры до плоскости изображения – f ; размером изображения оптически контрастной части маяка – a ; размером изображения маяка – b ; размером фотоматрицы – $c \times d$.

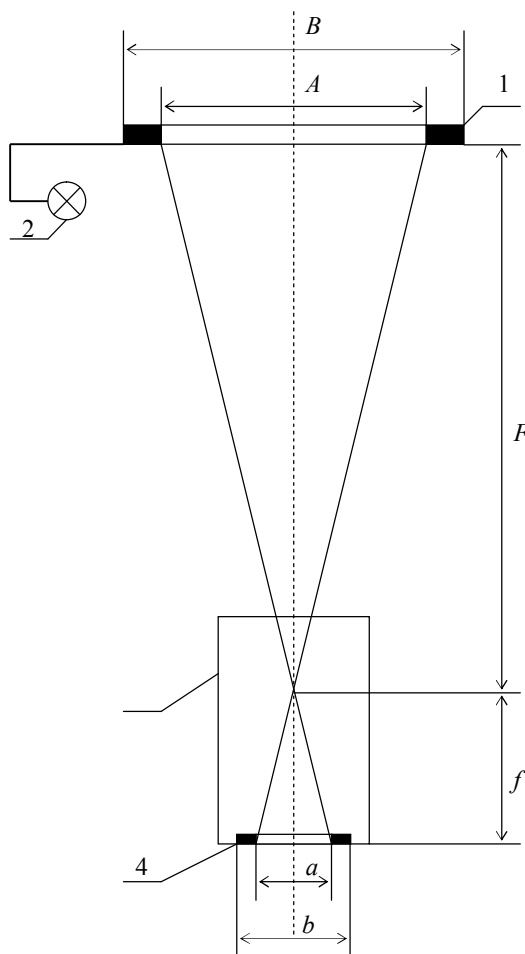


Рис. 1. Геометрическая схема формирования изображения оптического маяка

Для обоснования возможности оценки параметров торможения методом проекций необходимо проверить соблюдение принципов физической и технической реализуемости.

Физическая реализуемость. Принцип физической реализуемости заключается в наличии физической закономерности, которая связывает измеряемую физическую величину с оцениваемыми параметрами.

Измеряемой физической величиной в рассматриваемом случае является площадь изображения контрастной части маяка S_K в момент времени t . По зависимости $S_K(t)$ для соответствующего момента времени t оцениваются параметры: расстояние – $F(t)$, скорость объекта – $V(t)$, ускорение объекта – $w(t)$.

Из элементарных геометрических соображений выводится соотношение, связывающее площадь изображения контрастной части маяка $S_K(t)$ с площадью контрастной части маяка S :

$$S_K(t) = S \frac{f^2}{F^2(t)}. \quad (1)$$

Так как значения геометрических величин f , S известны и неизменны, то из (1) получим выражение для оценки расстояния F :

$$F(t) = f \sqrt{\frac{S}{S_K(t)}}. \quad (2)$$

Фотокамера формирует кадр за интервал Δt , поэтому мы будем иметь дело с дискретизацией непрерывной функции $F(t)$, $F_i = F(t_i)$, $i = 1, \dots, N_0$:

$$F_i = f \sqrt{\frac{S}{S_K(t_i)}}. \quad (3)$$

Из набора значений F_i , $i = 1, \dots, N_0$ можно оценить текущие значения скорости $V_i = V(t_i)$ и ускорения $a_i = a(t_i)$:

$$V_i = \frac{F_i - F_{i-1}}{\Delta t}, \quad a_i = \frac{F_{i+1} - 2F_i + F_{i-1}}{\Delta t^2}. \quad (4)$$

При малых значениях Δt погрешности вычисления скорости и ускорения по указанным выше формулам могут быть значительными. Для практических приложений можно рекомендовать либо прореживание набора F_i , $i = 1, \dots, N_0$, либо оценку скорости и ускорения на всём интервале времени торможения или его частях методом наименьших квадратов.

Выражения (1-4) представляют собой физические закономерности, связывающие измеряемую физическую величину (площадь изображения контрастной части маячка) с оцениваемыми параметрами торможения (расстоянием, скоростью, ускорением). Это означает, что способ оценки параметров торможения по результатам анализа последовательных фотографических изображений является физически реализуемым.

Техническая реализуемость. Принцип технической реализуемости заключается в наличии измерительных средств, позволяющих оценить параметры торможения с заданной точностью за определенное время. В данном случае к измерительным средствам относятся оптический маяк, источник светового излучения и фоторегистратор.

К исходным параметрам, необходимым для выбора характеристик измерительной схемы, относятся: Δt – время дискретизации (время измерения); F_{\min} – минимальное и F_{\max} – максимальное значения расстояния от оптического маяка до регистратора; ΔF , ΔV , Δa – погрешности измерений расстояния, скорости и ускорения; V_{\max} – максимальное значение скорости и a_{\max} – ускорения лифта. Заметим, что для фоторегистраторов время дискретизации и время на формирование единичного кадра могут не совпадать.

Для обоснования технической реализуемости рассматриваемого оптического метода для оценки параметров движения лифта необходимо подобрать размеры оптического маяка и фоторегистратор.

Основная рекомендация по подбору оптического маяка – максимально возможный размер. Проекция оптического маяка на плоскость изображения для минимального расстояния от фоторегистратора до маяка должна занимать наибольшую часть фотоматрицы. Указанное требование достигается не только физическим размером фотоматрицы, но и оптическим увеличением фотокамеры. Частота кадров фоторегистратора однозначно связана с требуемой погрешностью измерения расстояния.

В фоторегистраторе формируется цифровое полутоновое изображение. Размеры цифровых изображений измеряют в пикселях. Пусть фоторегистратор ориентирован так, что соответствующие границы изображения маяка и фотоматрицы параллельны. Изображение маяка представляет собой матрицу размерами $L \times L$ с яркостью f_{ij} в точке с координатами i, j . На изображении маячка будут выделяться более яркая центральная контрастная часть и окаймляющая темная граничная полоса. Ширина граничной полосы не является критичным параметром. Единственное ограничение ее ширина не должна при максимальном удалении маяка от плоскости изображения быть меньше нескольких пикселей. Погрешность определения S_K обуславливается тремя основными факторами. Первый фактор – геометрический, он связан с тем, что границы проекции контрастной части маяка на плоскость изображения не совпадают с физическими границами пикселей. Яркость в пикселях на границе изображения контрастной части маяка меньше, чем для внутренней части изображения. Вторым фактор связан с флуктуациями яркости в элементах изображения. Влияние второго фактора на точность определения S_K тем больше, чем меньше уровень яркости. Третий фактор – алгоритмический, он связан с алгоритмом обработки изображения всего объекта. Алгоритм должен быть подобран так, чтобы минимизировать систематическую погрешность оценки искомой площади, обусловленной первым и вторым фактором, для всего диапазона расстояний от плоскости изображения до маяка.

Рассмотрим алгоритм обработки изображения. На выходе алгоритма должны получить оценку площади изображения контрастной части маяка – \tilde{S}_K . Полное изображение на выходе фоторегистратора имеет размеры в пикселях – $M \times N$, $M < N$. Индекс i соответствует строке изображения, а индекс j – столбцу. Яркость в точке с координатами i, j – f_{ij} принимает значения из интервала от 0 до 255 – оттенки серого, "0" соответствует чистому чёрному цвету, "255" соот-

ветствует чистому белому цвету. Выше сказано, что граничная полоса маяка имеет чёрный цвет. Так как достичь идеальной чистоты цвета практически невозможно, то будем считать, что пиксель с координатами i, j – чёрного цвета, если $0 \leq f_{ij} \leq m$, здесь $m \ll 255$ – уровень "чёрного". Контрастная часть маяка окрашена в белый цвет. Точка изображения имеет белый цвет, если $n \leq f_{ij} \leq 255$, $n \gg m$, где n – уровень "белого". Уровень "белого" соотнесём с оттенком, связанным с изображением контрастной части маяка, а уровень "чёрного" – с тёмным граничным окаймлением. Определённые сложности обусловлены тем, что уровни "белого" и "чёрного" в нашем случае являются переменными величинами, зависящими от F – расстояния от оптического маяка до фоторегистратора. Кроме того, уровни "белого" и "чёрного" зависят еще от освещенности оптического маяка. Эти сложности легко устранимы на стадии предварительных экспериментальных исследований, цель которых заключается в установлении зависимостей $n(F)$ и $m(F)$ для заданного фоторегистратора, заданного источника светового излучения и способа подсветки. Помимо средних значений уровни "белого" и "чёрного" характеризуются соответствующими среднеквадратичными отклонения σ_n, σ_m .

Для оценки диапазонов изменений уровней "белого" и "чёрного" был проведен ряд экспериментальных исследований. Расстояние от фоторегистратора (фотоаппарат *Olympus FE-200*) до оптического маяка варьировали от 1 м до 3 м. Измерения проводили для естественного освещения (солнечный день, небольшая облачность) и искусственного освещения (лампы накаливания общей мощностью 200 Вт, расстояние от осветителя до оптического маяка – 4 м). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни "белого" n , "чёрного" m и шумов σ_n, σ_m

Освещение	Параметры	$F, м$		
		1	2	3
Естественное освещение	n	230,68	243,34	249,19
	m	17,2	32,02	40,72
	σ_n	3,23	5,31	7,64
	σ_m	5,23	12,96	19,52
Искусственное освещение	n	171,2	161,08	159,44
	m	20,1	22,7	23,38
	σ_n	3,63	2,75	2,73
	σ_m	4,39	3,39	3,109

Грубая оценка площади \tilde{S}_K находится по формуле

$$\tilde{S}_K \approx s_{\text{pix}} \sum_{(i,j) \in A} 1, \quad (5)$$

где s_{pix} – площадь единичного пикселя; множество точек A определяется соотношением $A = \{(i, j); f_{ij} \geq n\}$.

Так как оптический маяк имеет заданную форму, то на множество A накладываются ограничения связности и компактности. Упомянутые ограничения формализуются следующим образом: если точка $C = (i_1, j_1) \in A$ и точка

$D = (i_2, j_2) \in A$, то любая точка $X = (i_3, j_3)$, расстояние от которой до отрезка CD меньше половины физического размера пикселя, также принадлежит множеству A . Оценка площади (5) может оказаться недостаточно точной из-за влияния геометрического фактора. Для уменьшения влияния этого фактора на точность оценки S_K следует учесть все пиксели, граничащие с множеством A . Обозначим через grA множество всех пикселей, прилегающих к множеству A . Пусть пиксель с координатами i, j принадлежит множеству grA и имеет яркость f_{ij} , тогда добавка в общую сумму для этого пикселя равна $\frac{f_{ij} - m}{n - m}$. С учётом вышесказанного оценка площади S_K находится с помощью выражения

$$\tilde{S}_K \approx s_{\text{pix}} \left(\sum_{(i,j) \in A} 1 + \sum_{(i,j) \in grA} \frac{f_{ij} - m}{n - m} \right). \quad (6)$$

Оценка площади изображения контрастной части маяка по формуле (6) существенно ближе к истинному значению, чем оценка по формуле (5). Если число градаций "серого" велико, значение $n - m$ велико, флуктуации яркости в пикселях изображения отсутствуют, то систематическая погрешность оценки S_K будет близка к нулю. Погрешность оценки (6) обусловлена погрешностью дискретизации яркости по уровням и флуктуациями яркости в элементах изображения.

Приведем метод оценки чувствительности рассматриваемого способа. Если расстояние от маяка до фоторегистратора изменится от F до $F + \Delta F$, то чувствительность метода, то есть отношение прироста (уменьшения) площади оценки контрастной части маячка к изменению расстояния, находится по формуле

$$\frac{\Delta S_K}{\Delta F} = \frac{s_{\text{pix}}}{\Delta F} \left(\sum_{(i,j) \in \Delta A} 1 + \sum_{(i,j) \in gr(A + \Delta A)} \frac{f_{ij} - m}{n - m} \right), \quad (7)$$

где A – множество, соответствующее расстоянию F , а $A + \Delta A$ – множество, соответствующее расстоянию $F + \Delta F$.

Выражение (7) позволяет вычислить чувствительность метода $\frac{\Delta S_K}{\Delta F}$ для любого диапазона расстояний, любого числа градаций "серого", произвольной формы и ориентации маяка. Если чувствительность метода равна нулю $\left(\frac{\Delta S_K}{\Delta F} = 0 \right)$, то рассматриваемый метод является технически нереализуемым.

Условие $\frac{\Delta S_K}{\Delta F} \neq 0$ выполняется, если множество ΔA содержит хотя бы одну точку (**условие А**) или $f_{ij} > m$ хотя бы для одной точки границы (**условие В**). С учётом шумов условие **В** примет вид $f_{ij} > k + m$, здесь k – целое число, равное числу градаций "серого" шумовой составляющей изображения. Уровень шумов k определяется экспериментально для конкретного фоторегистратора, конкретного источника света и заданных параметров схемы измерения. За уровень шумов можно взять $k = 3\sigma_m$.

Из вышесказанного следует, что наиболее неблагоприятным вариантом взаимного расположения проекции границ маяка на плоскость изображения при анализе чувствительности рассматриваемого метода является случай параллельности границ маяка внешним границам фотоматрицы.

Оценим чувствительность исследуемого метода для указанного случая. Не теряя общности можно принять, что границы маяка для расстояния от фоторегистратора до маяка F совпадают с границами пикселей. При уменьшении расстояния от значения F до значения $F - \Delta F$ площадь изображения контрастной части маяка должна увеличиться на величину ΔS_K , вычисляемую по формуле

$$\Delta S_K = s_{\text{pix}} \left(\sum_{(i,j) \in \Delta A} 1 + \sum_{(i,j) \in \text{gr}(A+\Delta A)} \frac{f_{ij} - m}{n - m} \right). \quad (8)$$

Указанное выше условие **A** определяется первым слагаемым, а условие **B** – вторым слагаемым. Условие **A** в рассматриваемом случае означает, что площадь изображения контрастной части маяка увеличится за счет пикселей, расположенных по всему периметру изображения, за исключением, возможно, только четырех угловых пикселей. Это утверждение эквивалентно тому, что размер изображения маяка увеличится на два размера пикселя. Если обозначим через $N(F)$ зависимость размера изображения контрастной части маяка от расстояния между маяком и регистратором, то из выражения (1) легко получить соотношение, связывающее изменение размеров изображения на 2 размера пикселя с отклонением расстояния F на величину ΔF :

$$\Delta F = \frac{2F}{N(F) - 2}.$$

Можно подобрать минимальное расстояние между фоторегистратором и оптическим маяком так, чтобы значение $N(F_{\min})$ было близко к наименьшему размеру фотоматрицы, то есть к M , тогда

$$\Delta F = \frac{2F}{M \times \frac{F_{\min}}{F} - 2}.$$

Для современных быстродействующих фотоаппаратов $M = 2000$ и более. Если взять $\frac{F_{\min}}{F} = 0,222$, $F = 4500$ мм, то после подстановки этих значений в выражение получим $\Delta F \approx 20$ мм. Это значение можно считать удовлетворительным только для грубой оценки расстояния от фоторегистратора до оптического маяка.

Проверим, как повысится чувствительность при учете условия **B**. Условие взаиморасположения границ фотоматрицы и изображения контрастной части те же, что и выше. Условие **B** выполняется, если $f_{ij} > k + m$. Вклад в тон пикселя с координатами i, j внесут тона прилегающих пикселей (светлого и темного).

С учётом сказанного условие **В** перепишем в виде

$$\frac{(n - m) \times \Delta l}{l_{\text{pix}}} > k,$$

где Δl – расстояние между границей проекции маяка на плоскость изображения и границей контрастной части на изображении;

l_{pix} – физический размер пикселя;

m, n – текущие уровни "чёрного" и "белого".

Значение Δl для расстояния от маяка до плоскости изображения $F - \Delta F$ находится по формуле

$$\Delta l = \frac{Af}{F - \Delta F} - \left[\frac{Af}{(F - \Delta F)l_{\text{pix}}} \right] l_{\text{pix}}.$$

Введём следующие обозначения

$$p_1 = n - m; \quad p_2 = \frac{Af}{Fl_{\text{pix}}}.$$

Параметры p_1, p_2 имеют вполне определенный физический смысл. Значение параметра p_1 определяет разность градаций между уровнем "светлого", характеризующего изображение центральной части оптического маяка, и уровнем "тёмного" для граничной области маяка. Значение параметра p_2 – это размер в пикселях изображения контрастной части маяка. С учетом указанных обозначений и выражения для вычисления Δl условие **В** примет конечный вид

$$p_1 \left(\frac{p_2}{1 - \delta_F} - \left[\frac{p_2}{1 - \delta_F} \right] \right) > k, \quad (9)$$

где $\delta_F = \frac{\Delta F}{F}$ – чувствительность оптического метода измерения расстояния по анализу потока фотографических изображений.

Выше сказано, что зависимости уровней "белого" и "чёрного" зависят от расстояния F и эти зависимости могут быть оценены экспериментальным путем, поэтому зависимость параметра p_1 от расстояния F описывается формулой $p_1(F) = n(F) - m(F)$. Из этого равенства очевидным образом следует, что значение параметра p_1 с возрастанием F не возрастает. Это означает, что необходимо оценить чувствительность метода для максимального значения расстояния F .

Соотношение (9) и экспериментальная зависимость $p_1(F)$ позволяют связать все параметры рассматриваемого метода с его чувствительностью. В табл. 2 приведены результаты расчетов δ_F для уровня шумов $k = 10$, значение параметра p_1 варьировали в диапазоне от 100 до 240 единиц, а параметра p_2 в диапазоне от 15 до 150.

Продemonстрируем алгоритм использования табл. 2. Из табл. 1 для естественного освещения получим для расстояния $F = 4,5$ м значение параметра $p_1 = n - m \approx 210$. Меньший размер фотоматрицы – 3216 пикселей, при минимальном расстоянии (1 м) размер изображения контрастной части оптического маяка – 2475 пикселей, тогда размер изображения контрастной части оптиче-

ского маяка при его удалении от фотоматрицы на расстояние 4,5 м будет не меньше 550 пикселей. Указанному размеру соответствует чувствительность $\delta_{\text{lim}} = 0,009 \%$, что в абсолютных размерах соответствует 0,41 мм. Полученная погрешность оценки максимального расстояния от оптического маяка до фото-регистратора можно считать удовлетворительной.

Таблица 2

Предельные погрешности измерений расстояния δ_{lim} , %

p_2 , кол-во пикселей	p_1 , градаций серого							
	120	135	150	165	180	195	210	225
150	0,056	0,042	0,033	0,028	0,024	0,021	0,019	0,017
200	0,049	0,037	0,030	0,025	0,021	0,019	0,016	0,015
250	0,045	0,033	0,027	0,022	0,019	0,017	0,015	0,013
300	0,040	0,030	0,024	0,020	0,017	0,015	0,013	0,012
350	0,037	0,028	0,022	0,019	0,016	0,014	0,012	0,011
400	0,034	0,026	0,021	0,017	0,015	0,013	0,011	0,010
450	0,032	0,024	0,019	0,016	0,014	0,012	0,011	0,010
500	0,030	0,022	0,018	0,015	0,013	0,011	0,010	0,009
550	0,028	0,021	0,017	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008

В статье обоснована возможность измерения параметров торможения лифтов и подъёмников на основе анализа потока фотоизображений. Предложен алгоритм обработки цифровых полутоновых изображений. Метод может быть применён также для оценки параметров движения перемещающихся объектов для пространств ограниченного доступа.

Литература

1. **Технический** регламент о безопасности лифтов // Безопасность труда в промышленности, 2009. № 11. С. 52-64.
2. **Красовский А.А., Антонов А.Ю.** Определение положения лифта и параметров движения методами инерциальной навигации // Лифт, 2010. № 8. С. 23-28.
3. **Садеков Р.Н.** Определение дальности до объекта на основе анализа его изображений // Известия института инженерной физики, 2010. Т. 2. № 16. С. 65-67.
4. **Бачевский С.В.** Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорции в матричных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения, 2010. № 1. С. 57-66.