

УДК 621.318.56

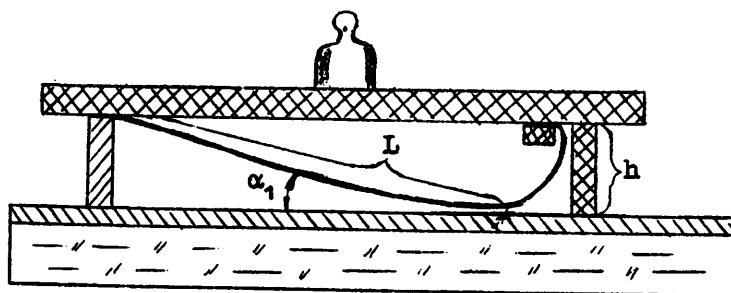
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЛЕНТОЧНЫХ
ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУРАХ С МАЛЫМИ УГЛАМИ НАКАТА

В.В.Коняшкин

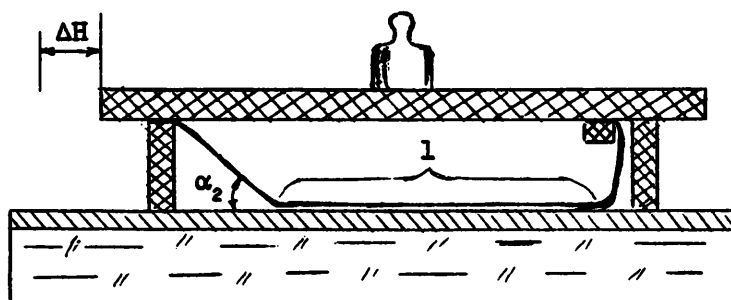
В последнее время в научно-технической литературе [1-3] появились работы, посвященные исследованию электростатических сил при накате одного электрода на другой, в том числе когда один из электродов является пленочной лентой. Процессы электростатического наката связаны с проявлением большого числа дополнительных факторов, которые не имеют места при электростатическом притяжении твердых проводящих тел без промежуточных слоев диэлектриков.

Работы [2,3] посвящены исследованию электростатических сил наката тонкой полимерной пленки на неподвижный электрод, однако методика, описанная в них, малоприспособлена для исследования сил при малых углах наката. В настоящей работе описывается методика, позволяющая проводить исследование сил электростатического наката при малых углах наката.

Схематическое изображение устройства представлено на рис.1. Оно состоит из плоского основания и подвижной платформы на опорах, располагающейся на основании, поверхность которого покрыта проводящим слоем. В описываемых опытах в качестве основания использовалась стеклянная пластина, покрытая слоем проводящего окисла SnO_2 . Платформа изготавливалась из пластинки диэлектрика (гетинакс), опоры выполнялись из фторопласта.



а)



б)

Рис. 1

та. На поверхности платформы, которая обращена к основанию, закреплялась петля из пленки полиэтилентерефталата, металлизированной алюминием, таким образом, чтобы она была обращена диэлектрической поверхностью к проводящему слою основания. Высота опор h и расстояние между местом закрепления конца пленки и местом касания петель основания L определяют начальный угол наката α_1 . Исходное положение платформы по-

казано на рис. 1а. При подаче электрического напряжения на проводящее покрытие основания и металлизацию ленты, пленка притягивается к основанию, фиксируется на нем и затем накатывается на него, создавая тем самым тяговое усилие, которое заставляет платформу перемещаться по основанию, до тех пор пока сила трения и тяговое усилие не уравниваются. Это положение показано на рис. 1б, где l - длина накатившегося участка ленты, а α_2 - величина конечного угла между плоскостью основания и пленкой полиэтилентерефталата (лавсана). При этом платформа переместится на новое положение, сдвинувшись относительно исходного на величину ΔH . На платформу можно помещать дополнительный груз, изменяя таким образом величину силы трения. Измерение перемещения платформы производилось на установке, содержащей источник света с параллельным пучком и фотодиод. На платформе закреплялся непрозрачный козырек, который при движении перекрывал часть светового пучка, при этом уменьшался фототок. В установке использовался фотодиод ФД-24К, предварительно откалиброванный. Была снята калибровочная кривая - зависимость фототока от величины светового отверстия фотодиода. Для удобства работы окно фотодиода закрывалось непрозрачной маской, в которой вырезано прямоугольное отверстие. При калибровке перемещение платформы осуществлялось микровинтом, а величина перемещения измерялась с помощью микроскопа МБС-2. Фототок фиксировался графопостроителем Н-306. Для питания устройства использовалось переменное напряжение частотой 400 гц, включение производилось с помощью тиристорного ключа [4].

На рис. 2 приводится геометрическая схема устройства, используя которую, можно получить формулы для величины ΔH , силы тяги. Расчет проводится без учета инерционных сил, лента считается абсолютно гибкой.

На рис. 2 представлено начальное положение y_0, α_1 , где y_0 - высота опор h , $x_1 y_1$ - длина ленты от места закреп -

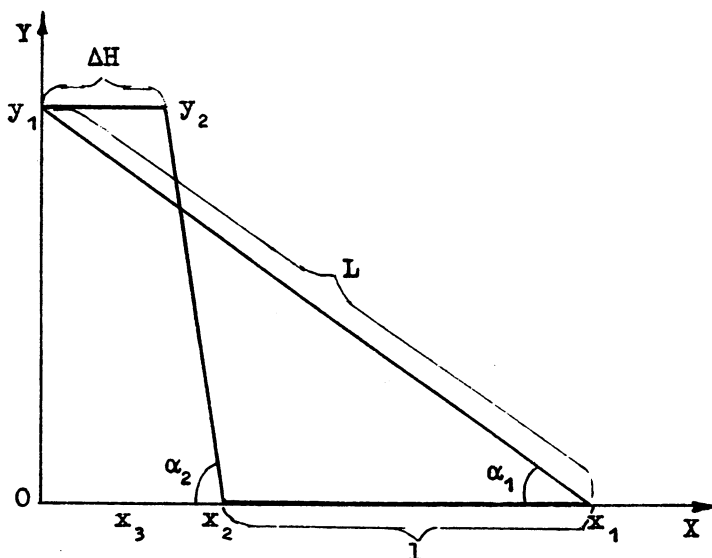


Рис. 2

ления на платформе до места касания пленкой проводящего покрытия L . В конечном состоянии пленочная петля занимает положение $x_1 x_2 y_2$, где $x_1 x_2$ - длина накатившейся части пленки l , ΔH - величина перемещения, на которую переместилась платформа; длина петли в процессе движения не меняется, так что $L = l + x_2 y_2$, α_1 и α_2 - углы наката на - чальный (до начала движения) и конечный (когда платформа остановилась) соответственно. Таким образом, проекции на ось Y можно записать: начальное состояние $OY_1 = L \sin \alpha_1$, конечное состояние $x_3 y_2 = (L - l) \sin \alpha_2$. Поскольку высота опор h в процессе движения не меняется, то можно записать

$$L \sin \alpha_1 = (L - l) \sin \alpha_2. \quad (1)$$

Проекция на ось X можно записать:

$$\begin{aligned} \text{начальное состояние } OX_1 &= L \cos \alpha_1, \\ \text{конечное состояние } x_3 x_2 &= (L-1) \cos \alpha_2. \end{aligned}$$

Из схемы на рис.2 видно, что

$$L \cos \alpha_1 = 1 + (L-1) \cos \alpha_2 + \Delta H. \quad (2)$$

Тогда из (1) и (2), исключив 1 и сделав ряд преобразований, получим формулу для ΔH :

$$\Delta H = L(1 - \cos \alpha_1) \left\{ \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_2}{1 + \cos \alpha_2}} - 1 \right\}. \quad (3)$$

Величина ΔH , рассчитанная по формуле (3), очень хорошо совпадает с величиной ΔH , полученной в эксперименте, однако пользоваться этой формулой не очень удобно, поскольку требуется знать длину наката l , которую необходимо измерять в ходе эксперимента, так как конечный угол наката α_2 определяется из формулы $\sin \alpha_2 = \frac{h}{L-1}$, в то время как начальный угол наката α_1 можно определить из соотношения $\sin \alpha_1 = \frac{h}{L}$, измерив геометрические размеры устройства.

С другой стороны, известно [1], что сила натяжения на единицу ширины накатившейся пленки равна

$$N = \frac{a_H}{1 - \cos \alpha},$$

где α - угол наката, а a_H - работа наката

$$a_H = \frac{C_0 U^2}{2},$$

C_0 - емкость единицы площади накатившейся пленки при заданных

U и усилия натяга N (U - электрическое напряжение, приложенное к структуре).

Учитывая это, определяем силу тяги платформы при произвольном угле α , она может быть определена из формулы

$$N_T = \frac{a_H \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} . \quad (4)$$

Или, перенеся a_H в левую часть, получаем

$$\frac{N_T}{a_H} = \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha} . \quad (5)$$

Обозначив правую часть через γ , получим для начального и конечного состояний соответственно

$$\gamma_1 = \frac{N_{T1}}{a_H} = \frac{\cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} , \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \frac{N_{T2}}{a_H} = \frac{\cos \alpha_2}{1 - \cos \alpha_2} . \quad (7)$$

Используя формулы (3), (6), (7) и сделав ряд элементарных преобразований, получаем выражение для ΔH как

$$\Delta H = \frac{I_1}{1 + \gamma_1} \left\{ \sqrt{\frac{1 + 2\gamma_1}{1 + 2\gamma_2}} - 1 \right\} . \quad (8)$$

Условие остановки платформы можно записать в виде равенства конечной силы тяги и силы трения

$$N_{T2} \cdot b = k \cdot \left[Mg + \frac{a_H \sin \alpha_2 \cdot b}{1 - \cos \alpha_2} \right] , \quad (9)$$

где b - ширина накатываемой полимерной ленты, k - коэффи-

коэффициент трения, M - перемещаемая масса (включает в себя и массу платформы), g - ускорение силы тяжести. Подставляя в формулу (9) значение конечной силы тяги, получим

$$\frac{a_H \cos \alpha_2 \cdot b}{1 - \cos \alpha_2} = k \cdot \left[Mg + a_H b \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha_2}{1 - \cos \alpha_2}} \right] \quad (10)$$

или

$$\gamma_2 = k \cdot \left[\frac{Mg}{a_H b} + k + \sqrt{\frac{2Mgk}{a_H b} + k^2 + 1} \right] \quad (11)$$

Таким образом, зная геометрические размеры устройства и функциональную зависимость $C_0 = f(U, N)$ из формулы (8) можно рассчитать величину перемещения ΔH , а из формулы (5) величину силы тяги платформы при различных значениях управляющего электрического напряжения U и перемещаемой массы M , для различных материалов, которые используются в качестве подвижных и неподвижных элементов пленочных емкостных структур.

Для проведения экспериментов было изготовлено устройство (платформа) со следующими геометрическими размерами: высота опор $h = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м, длина ленточной петли $L = 32,25 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве ленты использовалась пленка полиэтилентерефталата толщиной $4 \cdot 10^{-6}$ м, шириной $b = 25 \cdot 10^{-3}$ м, на пленку был нанесен слой Al , металлизация толщиной $\cong 70 \cdot 10^{-9}$ м. Масса собственно пустой платформы составляла $13 \cdot 10^{-3}$ кг. Для питания использовалось напряжение U , частотой $f = 400$ гц. Величина перемещения ΔH определялась с помощью фотодиода ФД-24К. Проводилось двадцать измерений ΔH при заданных значениях U и M , затем вычислялось среднеарифметическое значение $\overline{\Delta H}$, данные одной из серий измерений приведены в таблице. На рис. 3

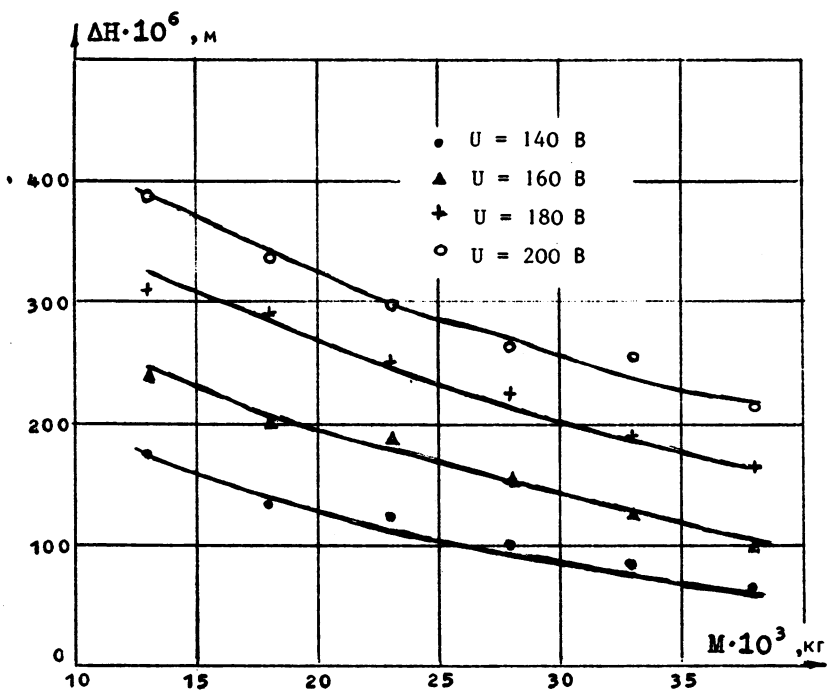


Рис. 3

приведены графики зависимости $\overline{\Delta H}$ от величины нагрузки M для разных значений напряжения питания U . Разброс величины ΔH составляет $\pm 10\%$. Проводя анализ и сопоставления расчетных и экспериментально полученных значений величин ΔH , мы получаем очень хорошее совпадение эксперимента с расчетом, используя формулу (3). Попытка использовать для расчета данные C_0 из [5] для расчета ΔH по формуле (8) дает только качественное совпадение, которое можно использовать как верхнюю границу, кроме того, из этого становится ясно, что для каждого материала, который будет использоваться в качестве

Т а б л и ц а

Величины $\Delta H \cdot 10^6$, м, полученные при напряжении $U = 160$ В
с различными значениями нагрузок

№ п/п	$M \cdot 10^3$, кг					
	13	18	23	28	33	38
1	215	185	150	130	110	100
2	220	190	145	130	120	100
3	240	195	160	140	140	95
4	240	170	175	130	120	110
5	260	175	170	140	130	110
6	260	200	165	125	130	110
7	225	190	140	135	125	95
8	270	185	170	130	125	95
9	270	195	175	140	120	95
10	270	195	165	150	130	95
11	270	185	160	120	125	100
12	230	185	160	165	135	90
13	250	185	160	160	135	90
14	225	180	160	145	120	105
15	265	170	155	145	125	90
16	265	165	160	150	130	100
17	250	190	160	120	110	90
18	240	170	150	120	130	120
19	215	180	130	140	140	100
20	220	170	170	135	120	95
ΔH	245	183	159	138	126	99

подвижного электрода в пленочных структурах необходимо предварительно снять экспериментальную зависимость $C_0 = f(U, N)$, как функцию от напряжения питания, натяга и чистоты обработки поверхности. Только эти данные C_0 , подставленные в формулу, (8), дадут возможность получить объективные расчетные величины ΔH .

Как уже говорилось выше, при расчете ΔH используются статические характеристики, исходя из условий, что время действия напряжения питания достаточно большое. Если же это время в ходе эксперимента будет уменьшаться, необходимо для расчета ΔH решать динамическую задачу.

В заключение автор выражает глубокую благодарность своим коллегам В.Л.Дятлову, Б.С.Потапову и Ю.А.Пьянкову за полезные замечания и обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. FUJITA H., OMODAKA A. The Fabrication of an Electrostatic Linar Actuator by Silicon Micromachinig //IEEE Transactions on Electron Devices.- 1988. - Vol. 35, N 6. -P.731-734.

2. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Структуры М-Г-Д-М с подвижными пленками // Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1982. - Вып. 95: Вычислительные системы. - С. 3-23.

3. КОНЯШКИН В.В. Релаксация сил в пленочных емкостных структурах //Там же. - С. 54-61.

4. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Световой затвор с большой апертурой и модулятор излучения с электростатическим приводом //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1985. - Вып. 110: Вычислительные системы. -С. 35-46.

5. ПОТАПОВ Б.С. Вольтфарадные характеристики емкостных структур пленочной электромеханики //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1982. - Вып. 95: Вычислительные системы. - С. 24-53.

Поступила в ред.-изд.отд.

4 октября 1989 года