

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ШАГОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
В ЛЕНТОЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ СТРУКТУРЕ

Б.С. Потапов

В работе [1] кратко описана схема установки (рис.2 в [1]) для измерения силы N натяжения односторонне металлизированной полиэтилентерефталатной (ПЭТФ, лавсан) ленты при ее накате на электрод под действием электростатических сил и приведена "сглаженная" экспериментальная зависимость $N = f(U)$, где U - разность потенциалов между электродом и слоем металла - ции ленты.

Полученные в [1] экспериментальные данные позднее анализировались авторами [2], но по-прежнему вне детального обсуждения остался ряд фактов, наблюдаемых в опыте.

1. В частности,

а) накатывание ленты на электрод начинается с некоторой пороговой величины напряжения U_n , причем эта величина зависит от значения угла α между плоскостью электрода и плоскостью не прижатого к нему конца ленты;

б) при плавном увеличении разности потенциалов лента накатывается на электрод (при $\alpha = \text{Const}$) дискретными толчками (скачками).

Это иллюстрирует рис.1, где показан фрагмент семейства экспериментальных зависимостей $l = f(U)$ для десятимикронной лавсановой ленты при различных углах наклона электрода к ее плоскости ($\alpha = 15^\circ; 25^\circ; 35^\circ$). Здесь же приведена зави-

висимость $l = f(U)$ для ленты ПЭТФ толщиной $3 \cdot 10^{-6}$ м при $\alpha = 25^\circ$ (сплошная линия). Ширина лент и слоя ($\sim 1000 \text{ \AA}$) Al-металлизации на них $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м и $b_M = 10 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Перемещение l измерено микрометрическим глупиномером (ГОСТ 7470-67) с ценой деления нониуса 10^{-5} м.

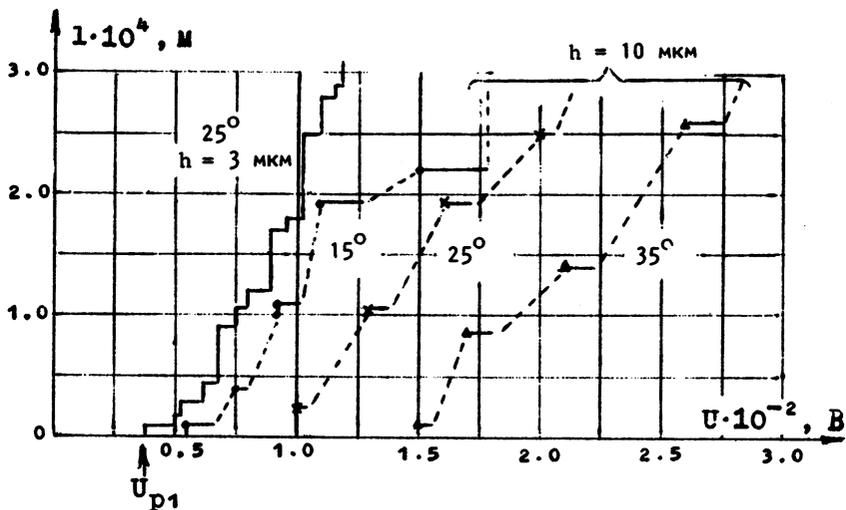


Рис. 1

Опыты проводились при следующих условиях и ограничениях. Оптически полированным стеклянным кубиком конец односторонне металлизированной ленты зажимался на плоском оптически полированном электроде. Электрод с провисающей лентой устанавливался на поворотный механизм так, чтобы ось вращения механизма совпадала с границей заземления ленты. Поэтому при горизонтальном положении электрода угол между ним и плоскостью свисающей ленты составлял 90° . Поворот электрода относительно горизонта вниз на угол α автоматически на эту же величину уменьшал угол между лентой и электродом. Второй конец ленты закреплялся в зажиме на конце плоской пружины. Размеры плоской пружины

(длина $L_n = 1,13 \cdot 10^{-1}$ м, ширина $b_n = 11 \cdot 10^{-3}$ м, толщина $d = 0,39 \cdot 10^{-3}$ м) и модуль упругости ее материала $E_n \approx 1,1 \cdot 10^{11}$ н/м² обеспечивали прогиб ее конца на $l = 10^{-5}$ м при усилии $P = 12,1 \cdot 10^{-5}$ н ($l = \frac{PL_n^3}{3E_n J_n}$, где $J_n = \frac{b_n d^3}{12}$

[3]). На оборотной, относительно зажима, стороне плоской пружины припаяна позолоченная контактная площадка, в которую при вращении микровинта глубиномера упирался позолоченный штырек от электрического разъема, установленный на месте стандартного щупа микрометра. Известно [4], что между золотой контактной парой при контактных усилиях порядка $10 \cdot 10^{-5}$ н достигается низкое переходное сопротивление (0,1-0,5 Ом). Это обстоятельство позволило наблюдать замыкание и размыкание контактов по омметру тестера, включенного между пружиной и микрометром, и фиксировать не менее пяти микрометров вертикального перемещения ленты. Перед измерениями вращением микрометра замыкались контакты. Увеличением напряжения добивались их размыкания. Вновь вращали микровинт до замыкания контактов и отсчитывали величину перемещения. На рис.1 перемещению l соответствуют вертикальные черточки. Опять увеличивалось напряжение до разрыва контактов. На графиках это отображается горизонтальными рисками. По такой методике снята зависимость $l = f(U)$ для ленты трехмикронной толщины. Семейство характеристик для десятимикронной ленты получено несколько иначе. После первых манипуляций, совпадающих с описанными выше, напряжение увеличивалось до некоторой произвольной величины и определялось вызванное этим напряжением перемещение. Штриховые наклонные линии на рис.1 соединяют точки, в которых происходила автоматически и производилась нами коммутация контактов. Различия в методах не влияли на результаты измерений.

Чтобы избежать неконтролируемого натяжения ленты при ее закреплении на пружине, расстояние между электродом и плоской

пружиной устанавливалось на 8-12 мм меньше, чем длина ленты. Следовательно, в исходном состоянии натяжение в ленте создавалось только ее собственным весом и лента имела свободный ход (провис) $l_{xx} = 8-12$ мм.

2. Поэтому, пока не "выбрался" свободный ход, взаимодействие ленты с электродом происходило по схеме рис. 2. Здесь

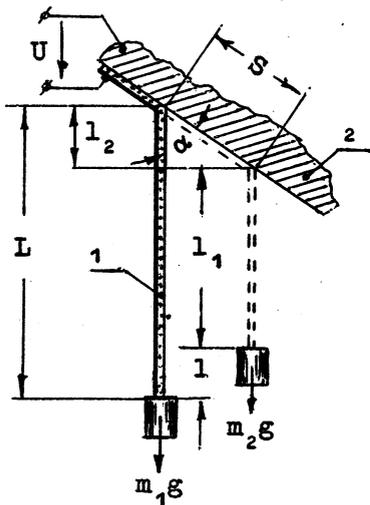


Рис. 2

m_1 - масса провисающей ленты 1 длиной L , а m_2 - масса ленты после того, как часть ее накатилась на электрод 2 под действием электростатических сил. Очевидно, что вертикальный подъем l ленты и длина S ее наката связаны соотношением $l = S(1 - \cos \alpha)$, где α - угол между провисающим концом ленты и электродом.

Приращение механической работы наката расходуется на подъем массы ленты и увеличение потенциальной

энергии ее изгиба $a_H b \cdot dS = N \cdot b \cdot dl + dA_{из}$, где a_H - удельная механическая работа наката. Выражение для энергии изгиба ленты может быть записано как [2]

$$A_{из} = 2b \cdot \sqrt{ND} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right),$$

где D - цилиндрическая жесткость, $D = \frac{E_D h^3}{12}$, E_D и h - соответственно модуль Юнга и толщина ПЭТФ-ленты, а сила N , действующая на единицу ширины ленты, для нашего случая равна

$$N = \frac{m_1 g}{b} = \gamma L b g, \text{ где } \gamma - \text{плотность материала ленты } g = 9,8 \text{ м/сек}^2 - \text{ускорение свободного падения.}$$

Учитывая, что

$$dA_{из} = b \sqrt{\frac{D}{N}} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) dN,$$

$$dN = \gamma h g dS, \quad dl = dS(1 - \cos \alpha),$$

получаем

$$a_H = N \frac{dl}{dS} + \sqrt{\frac{D}{N}} (1 + \cos \frac{\alpha}{2}) \frac{dN}{dS}$$

и окончательно

$$a_H = \gamma h g L (1 - \cos \alpha) + h^2 \sqrt{\frac{E \gamma g}{12L}} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}).$$

Сопоставляя первый и второй члены равенства, убеждаемся, что приращением изгибной энергии можно пренебречь, так как при $L \approx 4 \cdot 10^{-1}$ м второй член меньше первого примерно на два порядка.

Как показано ранее [1,2], удельная механическая работа наката равна удельной электрической энергии, т.е. $a_H = W_H$

$$\gamma h g L (1 - \cos \alpha) \approx \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2h}, \quad (1)$$

где $\frac{\epsilon \epsilon_0}{h}$ - теоретическое значение приращения удельной (на единицу площади) емкости, а U - электрическое напряжение, приложенное к структуре.

Чтобы лента начала накатываться на электрод, к структуре следует приложить напряжение:

$$U_0 = h \sqrt{\frac{2 \gamma g L}{\epsilon \epsilon_0}} \sqrt{1 - \cos \alpha}. \quad (2)$$

Так для десятимикронной ПЭФ-ленты ($L = 3,9 \cdot 10^{-1}$ м), ортогональной плоскости электрода,

$$U_0^{90^\circ} = 10^{-5} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 3,9 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} \approx 189 \text{ В.}$$

Для ленты, расположенной под углом α относительно электрода,

$$U_0^{15^\circ} = 189 \sqrt{1 - \cos 15^\circ} \approx 35 \text{ В;}$$

$$U_0^{25^\circ} \approx 58 \text{ В;}$$

$$U_0^{35^\circ} \approx 80 \text{ В.}$$

Отметим, что если бы лента не была прикреплена к пружине, она целиком должна была накатиться на электрод, что очевидно из рассмотрения рис.2.

Однако в опытах такое накатывание наблюдалось редко, причем полной выборки свободного хода ленты не происходило вообще. По нашему мнению, это вызвано двумя причинами:

а) меньшим, чем теоретически ожидаемое, реальным приращением емкости структуры, что подтверждается экспериментально в работе [5]. Учесть данное обстоятельство можно введением множителя $\kappa < 1$ в числитель правой части формулы (1);

б) наличием желоба на свободно лежащей ленте. Наблюдено, что металлизированные ленты ($b_M < b$) всегда изогнуты в сторону лавсана, т.е. выпуклой является металлизированная поверхность лент. Возникновение желоба вызывается различием термических коэффициентов расширения материала ленты и слоя металла. Желоб на более тонких лентах заметнее. Механическая характеристика желобчатой ленты при изгибе показана на рис.3, заимствованном из [6]. У желоба существуют критический момент M_k и соответствующее ему пороговое значение угла изгиба ϕ_k ;

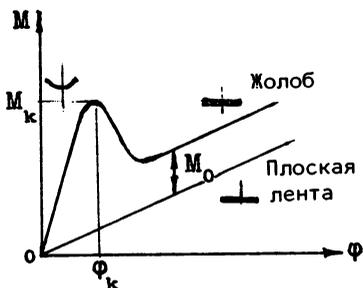


Рис. 3

M_0 - дополнительный момент, необходимый для выпрямления оси ленты в продольном направлении, $M_0 = \mu \cdot \frac{EJ}{1-\mu^2} \cdot \frac{1}{R}$, где μ - коэффициент Пуассона, R - первоначальный радиус кривизны желобка, $J = \frac{bh^3}{12}$.

Возможно, что для нашего случая достаточно определить пороговую энергию изгиба на единицу ширины ленты

($\Pi_{из} = \frac{M_k \phi_k}{b}$) и суммировать ее с левой частью формулы (1).

Рассчитаем теперь величину напряжения, вызывающего размыкание контактов. После их разрыва на ленту, кроме ее собственного веса, действует и упругая сила плоской пружины. Поэтому воспользуемся равенством (16) из работы [2], представив его в виде

$$a_{n1} = N_1 (1 - \cos \alpha) + k_{\Pi} \sqrt{\frac{D}{N_1}} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) (1 - \cos \alpha), \quad (3)$$

где

$$N_1 = \gamma h g (L_0 - \frac{i l_1}{1 - \cos \alpha}) + k_{\Pi} i \cdot l_1,$$

$$L_0 = L - l_{\text{xx}},$$

$$k_n = \frac{\epsilon d^3}{4L_n^3},$$

$i = 0, 1, 2, \dots, n$ - порядковый номер шага.

Учитывая, что $\varphi_i = W_n$, получаем

$$\frac{\epsilon \epsilon_0 U_{pi}^2}{2h(1 - \cos \alpha)} = N_i + k_n \sqrt{\frac{D}{N_i}} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}).$$

В этом равенстве слева записана электрическая сила, действующая на единицу ширины ленты, причем $\frac{\epsilon \epsilon_0}{h(1 - \cos \alpha)}$ - приращение удельной емкости структуры.

Правый член этого равенства - сумма механических сил, действующих на единицу ширины ленты.

Отсюда напряжение, приводящее к размыканию контактов, определяется как

$$U_{pi} = \sqrt{\frac{2h[N_i + k_n \sqrt{\frac{D}{N_i}} (1 - \cos \frac{\alpha}{2})]}{\epsilon \epsilon_0}} \cdot \sqrt{1 - \cos \alpha}. \quad (4)$$

Поскольку инструментальные возможности (микрометр) установки позволяют надежно фиксировать минимальное перемещение $l = 10^{-5}$ м, подсчитаем U_{p1} для шага $i = 1$. Для ленты толщиной $3 \cdot 10^{-6}$ м, наклоненной к электроду под углом $\alpha = 25^\circ$, получаем:

$$N_1 \approx 2,56 \cdot 10^{-2};$$

$$k_n \sqrt{\frac{D}{N_1}} = 6,28 \cdot 10^{-1};$$

$$U_{p1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,06 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 29 \text{ В.}$$

Измеренное в опыте напряжение, приводящее к размыканию контактов, равняется $U = 37 \text{ В}$ (рис. 1). Расчетное значение U_0 (формула (2)) для этой ленты составляет $U_0 = 17 \text{ В}$. Приращение $\Delta U_1 = U_{p1} - U_0 \cong 12 \text{ В}$ в эксперименте оставалось незаметным, так как при $U_0 \leq U < U_{p1}$ не наблюдалось наката ленты, выбиравшего бы длину холостого хода. Расчетные и экспериментальные величины U_{p1} для десятимикронной ленты сопоставлены в таблице.

Т а б л и ц а

Угол наклона электрода α^0	Расчетные данные, В			Эксперимент, В $U_{p1э}$
	U_0	ΔU_1	U_{p1}	
15	35	10	45	55
25	58	33	91	100
35	79	75	154	150

Расчетные значения $(\Delta U)_i = U_{p_i} - U_{p_{i-1}}$ при последующих коммутациях контактов (смотри описание методики измерений) составляют $\Delta U_i \approx 3 \text{ В}$ и не соответствуют экспериментально наблюдаемым. Заметим также, что, определяя в опыте (вращением микровинта) величину перемещения l_i , мы подpiraем пружину и несколько ослабляем за счет контактного усилия натяжение ленты. Удельно это ослабление составляет $(5-10) \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$, что соответствует контактному усилию $(6-12) \cdot 10^{-5} \text{ н}$. Этот факт может быть учтен в формулах (3) и (4), но существенно не повлияет на величину приращений ΔU_i .

Итак, формула (4) дает удовлетворительное совпадение с опытными данными по пороговой величине напряжения первого раз-

рыва контактов. Наличие "скачков" как по перемещению ленты, так и по соответствующим им довольно значительным приращениям напряжения свидетельствуют, по нашему мнению, в пользу пороговой механической характеристики ленты.

Заклучая этот раздел, оценим время накатывания ленты на электрод. Электростатической силой перемещается не только масса ленты, но и эквивалентная динамическая масса пружины. Эту массу можно считать равной 1/3 массы покоя, поскольку момент инерции пружины равен $J = \frac{m l_{ц}^2}{2}$, где $l_{ц}$ - расстояние от свободного кнца до центра вращения [6], равное $l_{ц} = 2/3 L_{п}$.

Тогда ускорение перемещения запишется:

$$a = \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{2h(1-\cos\alpha) \left(\gamma h L_0 + \frac{1}{3} \gamma_{п} L_{п} d \right)}$$

Откуда время, необходимое для перемещения на $S = \frac{l}{1-\cos\alpha}$ (при $\alpha = 25^\circ$, $h = 10 \cdot 10^{-6}$ м), составит

$$t = \sqrt{\frac{2S}{a}} \approx 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ сек.}$$

3. Из рис.1 видно, что, для получения одного и того же перемещения l (при механическом усилии $N = \text{Const}$ на ленте) к структуре, в зависимости от характеризующего ее угла α , необходимо приложить тем большее электрическое напряжение, чем больше значение угла. По сути, в рассматриваемой в работах [1,2] или на рис.2 структуре реализуется гибкий рычаг с отношением плеч, равным $(1-\cos\alpha)$.

Мысленно повернем рис.2 (относительно оси, перпендикулярной к плоскости чертежа) вправо на угол $\pi/2$ и перебросим

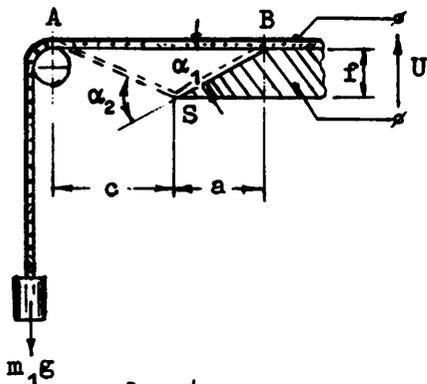


Рис. 4

свободный конец ленты через неподвижный блок (рис.4). Образовавшаяся конструкция, даже если принять, что трение между блоком и лентой отсутствует, значительно отличается от изображенной на рис.2. А именно, в структуре рис.4 при накате ленты на электрод изменяется

угол наката, что в конечном итоге приводит к остановке ленты.

Максимально возможное (при заданном напряжении на структуре) перемещение l_{\max} груза m_1g может быть определено из геометрических соотношений. При выбранных размерах (расстояние от оси блока до места закрепления ленты $AB=(a+c)$, высота f и проекция a длины наклонной плоскости электрода) имеем:

$$AS = c \sqrt{1 + \frac{f^2}{c^2}}; \quad BS = a \sqrt{1 + \frac{f^2}{a^2}}; \quad f < a, c,$$

$$AS + BS - AB = l_{\max}. \quad (*)$$

Разлагая в ряд левую часть выражения (*) и ограничиваясь двумя членами, получим

$$l_{\max} = \frac{f^2}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{c} \right).$$

Указанная на рис.4 принципиальная конструкция при ее усовершенствовании может быть использована в области, где применяются

известные ленточные передачи [7], т.е. для осуществления прецизионных перемещений рабочих органов в небольших пределах. Для обеспечения ее надежного функционирования необходимо, прежде всего, ограничить нормальное и изгибное механические напряжения так, чтобы они в сумме не превышали значения допустимого напряжения, а электрический потенциал на ленте был бы ниже пробивных значений для материала диэлектрика. При подсчете механических усилий следует учитывать увеличение натяжения на деформируемом (исходно горизонтальном) участке ленты за счет действия сил трения. Это увеличение может быть оценено по формуле

Эйлера, и искомое натяжение составит $T = m_1 g e^{\mu_0 \cdot \frac{\pi}{2}}$, где $\frac{\pi}{2}$ - угол охвата неподвижного блока лентой, T - натяжение на деформируемом электрическими силами участке ленты, а μ_0 - коэффициент трения.

Минимальное напряжение наката может быть оценено по модифицированной формуле (2):

$$U = \sqrt{\frac{2h \frac{m_1 g}{b} e^{\mu_0 \cdot \frac{\pi}{2}}}{\epsilon \epsilon_0}} \cdot \sqrt{1 - \cos \alpha}, \quad (5)$$

где $\frac{m_1 g}{b}$ - натяжение на единицу ширины ленты.

Величину реального перемещения рассчитать затруднительно, поскольку точно неизвестен коэффициент трения.

На рис.5 показана принципиальная схема устройства для пошагового перемещения груза. Призмённые электроды, второй и третий из которых с наклонными гранями, фрикционно касаются диэлектрической поверхности ленты, переброшенной через два неподвижных блока. Металлизированная сторона ленты является электрической общей точкой, и потенциалы на каждый из электро-

дов подаются относительно ее. В исходном состоянии лента уравновешена одинаковыми грузами и дополнительно может быть зафиксирована относительно электродов электростатическими силами.

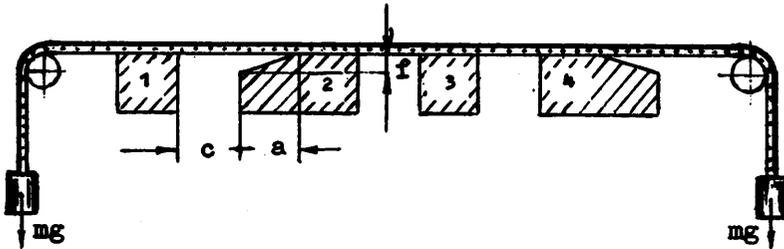


Рис. 5

Для перемещения левого груза следует приложить разность потенциалов между слоем металлизации на ленте и электродами 2,3,4, а электрод 1 гальванически соединить со слоем металлизации. Произойдет накатывание ленты на наклонную грань электрода 2, и груз поднимется на некоторую высоту. Подав потенциал на электрод 1 и сняв его с электродов 2, 3, 4 (обязательно с гальваническим соединением последних со слоем металлизации), осуществим вытягивание ленты вправо. Повторяя описанную процедуру, переместим левый груз на нужную высоту. Аналогично может быть осуществлен подъем правого груза.

Электропитание устройства следует осуществлять переменным напряжением [8]. Время наката ленты на электрод может быть оценено аналогично тому, как это выполнено в пункте 2 данной работы. Это время является ориентиром для выбора периода следования и длительности радиоимпульсов, подаваемых на электроды.

Однако питание радиоимпульсами, устраняя зарядку поверхности ленты, имеет свою негативную сторону. При прохождении переменного напряжения через нуль исчезают электростатические силы, что делает реальной возможность проскальзывания ленты.

Повышение частоты переменного напряжения укорачивает время, в течение которого не будет электростатических сил, но увеличивает потребляемую устройством мощность. Очевидно, что чем больший груз мы хотим поднять или чем выше требования к стабильности и точности перемещения, тем более высокую частоту питания следует применять.

Очевидно, что существует возможность укорачивать перемещение путем уменьшения длительности радиоимпульса.

Для наглядности произведем оценку реальных возможностей устройства для шагового перемещения (рис.5).

Используем лавсановую ленту толщиной $4 \cdot 10^{-6}$ м, шириной $1,3 \cdot 10^{-2}$ м с пределом прочности на разрыв $\sigma_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^8$ н/м² и пробивной напряженностью $E_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^8$ В/м [9]. На концы ленты навесим гирьки массой по 10 г каждая, что обеспечит сто-кратный запас по механической прочности. Величину напряжения ограничим значением $U = 330$ В, чтобы не допустить пробоев воздушного промежутка. При таком ограничении на рабочее напряжение выполняется условие $\frac{U}{h} = E_g < E$. Выберем $a = c = 10^{-2}$ м, а $l = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда $l_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{-4}$ м, а угол $\alpha \approx 11^{\circ}20'$.

Если коэффициент трения ленты о неподвижный блок принять равным $\mu_0 = 0,33$, то лента начнет движение при напряжении

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 1,69}{1,3 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-2}} \approx 277 \text{ В.}$$

При изменении угла наклона всего на один градус для начала движения потребуется уже напряжение $U \approx 297$ В. Поэтому перемещение ленты далеко не достигнет l_{max} , так как в этом случае (при выбранных размерах) изменение угла равнялось бы его исходному значению. Оценки показывают, что перемещение соста-

вит примерно $10 \cdot 10^{-6}$ м при $277 \text{ В} < U < 297 \text{ В}$ и на него потребуется около $55 \cdot 10^{-3}$ сек.

Изложенный здесь принцип шагового перемещения позволяет говорить о возможности получения даже ангстремных перемещений. Для реализации таковых нет необходимости изготавливать на подложке-носителе электроды с наклонными гранями. Достаточно организовать взаимодействие между натянутой балочкой и электродом по типу пленочного электростатического реле [10]. Незакрепленная балочка должна опираться на электрически изолированные от нее электроды-упоры высотой около 10^{-6} м. Расстояние между ними должно многократно превышать их высоту, например, в 200 раз. Посредине между этими упорами должен располагаться еще один узкий, электрически изолированный от них и балочки плоский электрод. Подача напряжения между этим электродом и балочкой приведет к прогибу последней с перемещением ее конца

примерно на $\frac{10^{-12}}{10^{-4}} \approx 10^{-8}$ м.

В заключение автор выражает признательность своим товарищам по работе Ю.А.Пьянкову, В.Л.Дятлову, В.В.Коняшкину за полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. Их же. Структура М-Г-Д-М с подвижными пленками //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск. - 1982. - Вып. 95: Вычислительные системы. - С. 3-23.
3. Краткий физико-технический справочник. Т.П. -М.:ГИФМЛ, 1962. - 417 с.
4. КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Переходное сопротивление пленочных контактов при малых контактных усилиях //Вычислительные системы. - Новосибирск. -1971. -Вып. 46: С. 33-36.

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

6. АНДРЕЕВА Л.Е. Упругие элементы приборов. -М.: Машгиз, 1962. - 455 с.

7. Справочник конструктора точного приборостроения. - М.-Л.: Машиностроение, 1964. - 943 с.

8. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с электростатическим приводом для устройств отображения информации и модуляции света //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск.-1981. -Вып. 84: Вычислительные системы. -С. 54-63.

9. Справочник по электротехническим материалам. Т.1.-М.: Энергоатомиздат, 1986. - 286 с.

10. А.С. 204440 (СССР). Электростатическое реле //Дятлов В.Л., Солдатенков И.С., Черепов Е.И. - Оpubл. в Б.И. 1967, № 22.

Поступила в ред.-изд.отд.

21 ноября 1989 года