

УДК 621.318.51:534.112:538.55

О ДИНАМИКЕ ЗАМКНИИ И РАЗМКНИИ КОНТАКТОВ
 ПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РЕЛЕ

Л.З.Новгородцева, Б.С.Потапов, С.И.Фадеев

I. Постановка задачи. Контактная система пленочного электростатического реле (ПЭР), как правило, работает при электрических нагрузках I_k, U_k , удовлетворяющих условиям $I_k < I_{0min}$ и $U_{0min} < U_k < U_{sm}^*$, где I_{0min} и U_{0min} - минимальные значения тока и напряжения горения стационарной дуги, $U_{sm}^* [1]$ - минимальное напряжение искрового разряда, U_k^* - значение напряжения на контактах, при котором происходит замыкание контактов под действием электростатических сил (срабатывание ПЭР по контакту).

Согласно модели ПЭР, рассмотренной в [2], значение U_k^* достаточно точно определяется как $U_k^* = \sqrt{\frac{16 N d_c^3}{27 \epsilon_0 S_c l}}$, где l - длина подвижного контакта, натянутого с силой N ; S_c - площадь взаимодействия контактов; d_c - исходный зазор между контактами; ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Изучение эрозионного износа при замыкании контактов показало [3], что при оговоренных выше условиях эрозии практически не наблюдается, а замыкание происходит без пробоя. Однако при напряжении на контактах, равном U_k^* , во всех случаях отмечено схватывание контактов, классифицированное нами как сварка. Столкновение наблюдаемого явления можно пытаться получить путем выделения времени движения контакта до замыкания и времени нахождения контакта под токовой нагрузкой. Такой подход позволил бы объяснить экспериментальные данные, приведенные в [4], и более обоснованно сформулировать требования к контактной системе ПЭР.

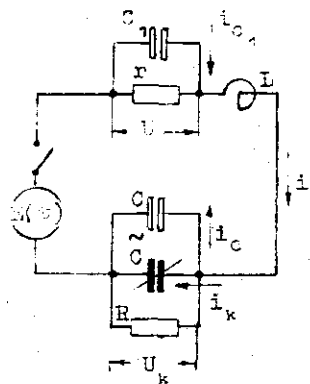


Рис. I

Экспериментальное определение параметров ПЭР проводится в большинстве случаев с осциллографированием происходящих процессов. Поэтому для математического моделирования логично воспользоваться эквивалентной схемой, показанной на рис. I. Собственно контакты ПЭР моделируются

емкостью $\tilde{C} = \frac{\epsilon_0 S_k}{d_c (1 - \gamma/d_c)} = \frac{C_0}{1 - \gamma/d_c}$, за-

шунтированной сопротивлением R (порядка 10^{12} ом) утечки по изолятору и емкостью C (порядка $(2-3) \cdot 10^{-12}$ ф) контактных ножек держателя. Последовательно с контактами включено

сопротивление нагрузки Z и индуктивность подводящих проводов L (порядка $(3-5) \cdot 10^{-6}$ гн). Осциллограф моделируется входной емкостью C_1 , параллельной нагрузочному сопротивлению контактов. В момент времени $t_1 = 0$ на входные клеммы цепи подается перепад напряжения $E(t) = U_0 (1 - e^{-\omega t})$, где U_0 — амплитуда, ω — постоянная времени, характеризующая крутизну фронта нарастания напряжения. Очевидно, что при условии $C_1 \gg \tilde{C}$ влиянием емкости C_1 на движение контактов при замыкании можно пренебречь. Это упрощение используется при решении задачи о замыкании контактов.

В момент замыкания контактов емкость C_1 оказывается заряженной практически до напряжения U_0 ($Z \gg Z_{конт}$) и способствует свариванию контактов. В данной работе этот вопрос не рассматривается, а полагается, что контакты обесточились сразу же после замыкания (мгновенный разрыв цепи со стороны питающего напряжения). Далее, с момента ($t_2 = 0$) замыкания входных клемм цепи ($E(t) = 0$) рассматривается процесс расхождения обесточенных контактов, разделенных зазором δ , причем емкость C_1 считается заряженной до напряжения U_0 . Зазор δ соответствует экспериментальному факту существования мостика замыкания контактов, находящихся под током, и численно равен длине мостика перед его взрывом (например, [1]).

Такой подход позволяет, не усложняя существенно задачу размыкания и варьируя в разумных пределах величину δ , определить возможные величины коммутируемых контактами напряжений.

2. Математическая модель. Механическая модель подвижного контакта ПЭР, как и в работе [5], представляет собой однородную струну, нагруженную посередине электростатической силой [2]. Колебания струны рассматриваются в среде с сопротивлением, причем сопротивление среды принимается линейно зависящим от скорости движения. В отличие от работы [5] движение контактов рассматривается теперь совместно с процессами, происходящими в электрической цепи. Численное решение задачи основано на замене однородной струны набором сосредоточенных масс, связанных между собой невесомыми и нерастяжимыми нитями. При этом уравнение колебаний струны в частных производных заменяется системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В качестве обобщенных координат рассматриваемой электромеханической системы приняты смещения y_j ($j = 1, 2, \dots, n$) сосредоточенных масс от положения равновесия, где n — число масс на половине длины струны*, и три электрических переменных u, i, q_k , где u — напряжение на емкости C_1 , i — ток через индуктивность L и q_k — заряд на емкости \tilde{C} (рис. I).

Уравнения движения сосредоточенных масс имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\rho l^2}{N} \frac{d^2 y_1}{dt^2} &= (2n-1)^2 (-3y_1 + y_2) - \frac{\beta l^2}{N} \frac{dy_1}{dt}, \\ \frac{\rho l^2}{N} \frac{d^2 y_j}{dt^2} &= (2n-1)^2 (y_{j-1} - 2y_j + y_{j+1}) - \frac{\beta l^2}{N} \frac{dy_j}{dt}, \\ \frac{\rho l^2}{N} \frac{d^2 y_n}{dt^2} &= 2(2n-1)^2 (y_{n-1} - y_n) - \frac{\beta l^2}{N} \frac{dy_n}{dt} + (2n-1) \frac{Fl}{N}, \end{aligned} \right. \quad (I)$$

где t — время, ρ — линейная плотность струны, β — коэффициент сопротивления единицы длины струны в данной среде, l — длина струны, F — электростатическая сила. Электрические колебания в цепи (рис. I) описываются системой уравнений:

* В силу симметрии задачи рассматривается половина струны.

$$\begin{cases} C, \frac{dU}{dt} = i - \frac{U}{z}, \\ L \frac{di}{dt} = E(t) - U - \frac{q_k}{C_0} (1 - \varphi_n), \\ \left[1 + \frac{C}{C_0} (1 - \varphi_n) \right] \frac{dq_k}{dt} = \frac{q_k}{RC_0} (1 - \varphi_n) - \frac{C_0}{C_0} \frac{d\varphi_n}{dt} - i, \end{cases} \quad (2)$$

где C_0 - величина емкости \bar{C} в положении равновесия, φ_n - нормированное перемещение n - массы, $\varphi_n = \frac{y_n}{d_k}$.

Введем следующие безразмерные величины:

$$\tau = \frac{t}{\alpha}, \quad \alpha = l \sqrt{\frac{P}{N}}; \quad \varphi_j = \frac{y_j}{d_k} \quad (j=1, 2, \dots, n),$$

$\varphi_{n+j} = \frac{d\varphi_j}{d\tau} \quad (j=1, 2, \dots, n)$ - безразмерные скорости сосредоточенных масс;

$\nu = \frac{\beta l}{\sqrt{\rho N}}$ - безразмерный коэффициент сопротивления среды;

$\bar{U} = \frac{U}{U_0}$ - безразмерное напряжение на емкости C ;

$\bar{i} = \frac{i z}{U_0}$ - безразмерный ток через индуктивность;

$Q_k = \frac{q_k}{U_0 C_0}$ - безразмерный заряд на контактах;

$E(\tau) = \frac{E(t)}{U_0} = 1 - e^{-k\tau}$ - безразмерное напряжение на контуре,

причем $k = \frac{\alpha}{\omega}$.

Переходя в (1) и (2) к указанным безразмерным величинам, получаем систему $(2n+3)$ дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_j}{d\tau} = \varphi_{n+j} & (j=1, 2, \dots, n), \\ \frac{d\varphi_{n+1}}{d\tau} = (2n-1)^2 (-3\varphi_1 + \varphi_2) - \nu \varphi_{n+1}, \\ \frac{d\varphi_{n+j}}{d\tau} = (2n-1)^2 (\varphi_{j-1} - 2\varphi_{j+1}) - \nu \varphi_{n+j} & (j=1, 2, \dots, n), \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{2n}}{d\tau} = 2(2n-1)^2 (\varphi_{n-1} - \varphi_n) - \nu \varphi_{2n} + (2n-1) \sigma Q_k^2, \\ \frac{d\bar{i}}{d\tau} = \frac{z\alpha}{L} [\bar{E}(\tau) - \bar{U} - Q_k (1 - \varphi_n)], \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{U}}{d\tau} = \frac{\alpha}{zC_1} (\bar{i} - \bar{U}),$$

$$\frac{dQ_k}{d\tau} = \frac{\alpha}{zC} \left[\bar{i} - Q_k (1 - \varphi_n) \frac{z}{R} \right] + Q_k \varphi_{2n} \frac{z}{1 - \varphi_n + \frac{C_0}{C}},$$

где $\sigma = \frac{C_0 l}{2N} \left(\frac{U_0}{d_k} \right)^2$ - безразмерный параметр, равный величине безразмерной электростатической силы \bar{F} при единичном заряде Q_k на контакте

$$\bar{F} = \frac{F l}{N d_k} = \sigma Q_k^2$$

Отметим, что выбор величины Q_k в качестве обобщенной координаты обусловлен удобством при численном решении системы уравнений (3), так как в этом случае отсутствует особенность в точке $\varphi_n = 1$. После определения Q_k путем решения системы (3) можно получить величину безразмерного контактного напряжения \bar{U}_k , равного напряжению U_k на контактах, отнесенному к характерному напряжению U_0 :

$$\bar{U}_k = Q_k (1 - \varphi_n). \quad (4)$$

Итак, требуется решить задачу Коши для системы (3) обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Начальные условия в задаче замыкания контактов выбраны нулевыми

$$\bar{i}(0) = \bar{U}(0) = Q_k(0) = 0; \quad \varphi_j(0) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 2n). \quad (5)$$

Начальные условия в задаче размыкания контактов имеют вид:

$$\bar{U}(0) = 1; \quad \bar{i}(0) = Q_k(0) = 0;$$

$$\varphi_j(0) = (1 - \delta) \frac{j - 0,5}{n - 0,5} \quad (j=1, 2, \dots, n); \quad (6)$$

$$\varphi_{n+j}(0) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, n),$$

где $\bar{\delta} = \frac{\delta}{d_k}$, а $\varphi_n(0) = 1 - \delta$, так как начальное смещение средней точки струны $y_n(0) = d_k - \delta$.

При решении обеих контактных задач система (3) с соответствующими начальными условиями (5) или (6) интегрировалась численно с применением основной формулы Рунге-Кутты. Погрешность на одном шаге интегрирования имеет порядок h^5 , где h — величина шага. Число масс на половине длины струны принималось равным $n = 100$ на основании сопоставления ряда расчетов (для $\nu = 0$) с результатами решения точного уравнения, приведенными в работе [5].

3. Результаты расчета.

Задача о замыкании контактов. Для конкретных значений параметров: $N = 7 \cdot 10^{-2}$ (н), $d_k = 10^{-6}$ (м), $\rho = 1,78 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}}\right)$, $C_0 = 8 \cdot 10^{-14}$ (ф), $C = 2 \cdot 10^{-12}$ (ф), $R = 10^{-12}$ (ом) и различных σ, k, ℓ, ν, L и ν просчитан ряд вариантов.

Оказалось, что электрический контур практически не влияет на граничное значение величины $\sigma_{min} \approx 0,51$, полученное в [5] и разделяющее два динамических режима: режим замыкания контактов при $\sigma > 0,51$ и некоторый колебательный процесс, наблюдающийся при $\sigma < 0,5$. Совпадение σ_{min} в данных расчетах и в [5], естественно, определяет и совпадение времен

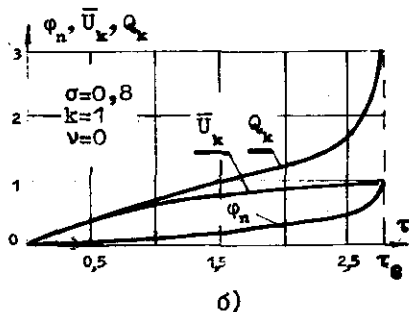
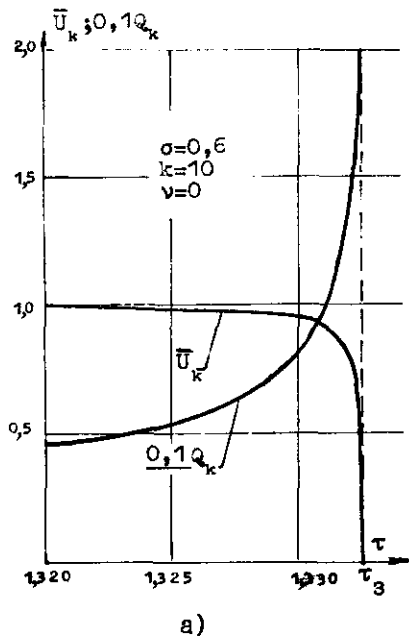


Рис. 2

замыкания τ_3 (см.табл.) и зависимость $\tau_3 = f(\nu)$ [5]. В таблице приведены результаты расчетов при $\sigma = 0,6$ вариации L, ν и двух значений длины подвижного контакта ℓ . Однако введение электрической схемы отразилось на характере электрических процессов, происходящих в рабочей цепи контакта. В частности, перед замыканием контактов происходит падение напряжения U_k между контактами при значительном возрастании тока в рабочей цепи. Особенно резкое падение напряжения U_k происходит в окрестности точки $\tau = \tau_3$. Для иллюстрации этого явления в таблице (стр.98) приведены значения U_k и i при $\varphi = 0,9$ и $\varphi = 0,95$, а на рис.2,а приведенны графики безразмерного напряжения между контактами U_k и соответствующего безразмерного заряда $Q_k = \frac{q_k}{U_0 C_0}$

в малой окрестности точки $\tau = \tau_3$ (величины параметров соответствуют 2-му варианту таблицы). Характер изменения величин Q_k, U_k, φ_n в диапазоне $0 < \tau < \tau_3$ показан на рис. 2,б.

Влияние сопротивления среды на предельную величину σ_{min} , при которой не происходит замыкания контактов, показано на рис.3. Кроме указанных ранее параметров, были зафиксированы значения $\ell = 0,27 \cdot 10^{-3}$ (м),

$\nu = 5 \cdot 10^3$ (ом), $L = 3 \cdot 10^{-6}$ (гн). На рис.3 изображены зоны, в которых лежат кривые $\sigma_{min} = f(k)$, так как значения σ_{min} определялись при счете с точностью до 0,01. Как видно из графиков, σ_{min} практически достигает максимального значения $\sigma_{min} = 0,6$ уже при $\nu = 2$.

Время замыкания τ_3 увеличивается с ростом ν , причем зависимость $\tau_3 = f(\nu)$ близка к линейной (по крайней мере, для $k \leq 10$) с коэффициентом пропорциональности $\sim 1,5$ для диапазона значений $0 \leq \nu \leq 3$.

Задача о размыкании контактов. При решении этой задачи варьировались три параметра δ, σ и ν , характеризующие, соответственно, длину мостика, при которой начинается расхождение контактов, начальное напряжение U_0 на емкости C ,

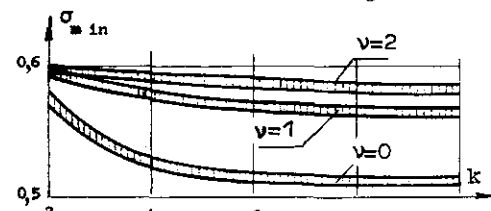


Рис.3

Сводка расчетных параметров для $\sigma = 0,6$; $\nu = 0$:
 варианты 1-5 получены при условиях: $l = 0,27 \cdot 10^{-3}$ м; $\alpha = 1,375 \cdot 10^{-6}$ сек; $l_0 = 61$ в; $k = 10$;
 вариант 6 при условиях: $l = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м; $\alpha = 9,7 \cdot 10^{-6}$ сек; $l_0 = 23,6$ в; $k = 183$

Величины	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
z (ком)	0,2	0,2	0,2	5	5	5
L (мкГН)	0	3	300	0	3	3
z_1 (мксек)	1,83	1,83	1,81	1,85	1,85	10,7
$\varphi = 0,9 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$ (ма)	7,7	3,27	0,783	1,48		0,263
$\varphi = 0,95 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$ (в)	59,4	57,3	50,7	53,6		22,3
$\varphi = 0,95 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$ (ма)	38,7	7,05	0,893	3,58	2,86	0,955
$\varphi = 0,95 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$ (в)	53,3	45,5	38,7	43,0	41,0	18,1
τ_1	1,33	1,33	1,32	1,34	1,34	1,17
$\varphi = 0,9 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$	0,0253	0,0107	0,00257	0,1215		0,0556
$\varphi = 0,95 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$	0,9747	0,9389	0,8322	0,8785		0,9420
$\varphi = 0,95 \begin{cases} z \\ L_c \end{cases}$	0,1268	0,0231	0,00293	0,2930	0,2345	0,2020
	0,8731	0,7456	0,6342	0,7070	0,6716	0,7673

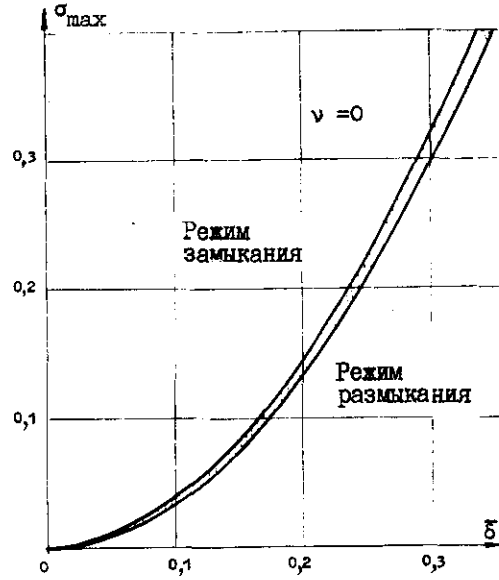


Рис. 4

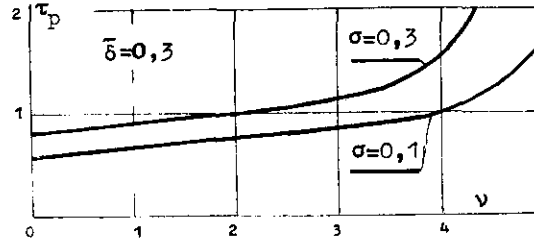


Рис. 5

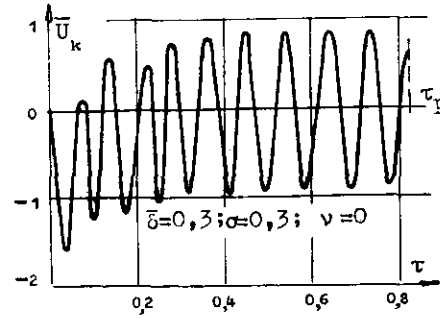


Рис. 6

($C = 40 \cdot 10^{-12}$ ф) и сопротивление среды. Значение остальных параметров оставались прежними.

При размыкании контактов, так же как и при замыкании, существует предельное значение параметра σ (при фиксированных значениях других параметров), разделяющее два динамических режима: режим, при котором контакты размыкаются, и режим, при котором размыкания вообще не происходит. Обозначим символом σ_{max} то максимальное значение σ , при котором ещё возможно размыкание. Тогда первый динамический режим будет при $\sigma < \sigma_{max}$. При втором режиме ($\sigma > \sigma_{max}$) контакты вначале могут несколько расходиться, но потом сближаются и наступает замыкание. На рис. 4 построена криволинейная полоса, которая содержит предельную кривую $\sigma_{max} = f(\sigma)$, разделяющую области существования двух динамических режимов при отсутствии сопротивления среды ($\nu = 0$). В области, ле-

лашей под предельной кривой, происходит размыкание контактов; область, расположенная над кривой, характеризуется отсутствием размыкания. При $\delta=0$ величина σ_{max} лежит внутри отрезка (0,0001-0,001). Заметим, что вместо кривой $\sigma_{max}=f(\delta)$ можно было бы построить соответствующую ей кривую $\delta_{min}=\delta_{min}(\sigma)$, разделяющую два динамических режима.

Проведенные расчеты показали, что сопротивление среды практически не влияет на величину δ_{min} при значениях $\sigma \leq 0,3$, но увеличивает время размыкания τ_p (рис.5). Заметим, что время размыкания фиксируется в момент прохождения средней точкой струны через положение статического равновесия.

Представление о характере процесса размыкания дано рис.6 и 7. Рис.6 показывает *) изменение во времени напряжения на размыкающихся контактах, рис.7, а - процесс изменения межконтактного зазора и уменьшения напряжения на емкости C . Анализ результатов счета показал, что колебания в электрической цепи происходят с двумя частотами. Более высокочастотные колебания можно наблюдать при увеличении масштаба графиков. Фрагмент графика $\varphi_n(\tau)$ показан на рис.7, б.

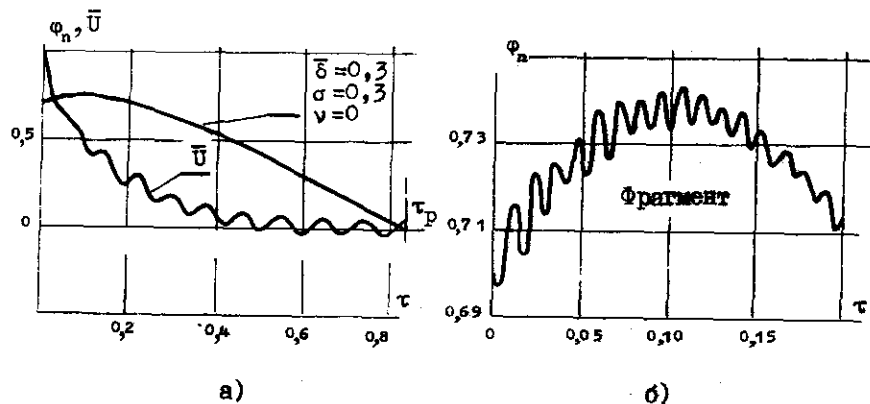


Рис. 7

*) При построении графика рис.6 использовалась формула (4).

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Сопротивление среды увеличивает величину минимального напряжения, приводящего к срабатыванию контактов. Для принятой модели с постоянным коэффициентом сопротивления среды относительное увеличение напряжения равно $\frac{\sigma_{min} \text{ при } \nu \neq 0}{\sigma_{min} \text{ при } \nu = 0} = 1,1 \div 1,2$.

2. Время движения контактов под действием импульсного напряжения с амплитудой $\sigma \geq (0,5 \div 0,6)$ (закрывание) и время удерживающего, релаксирующего напряжения с амплитудой $\sigma \leq 0,3$ (размыкание) определяются, в основном, собственной частотой механической системы.

3. Данные о времени движения контактов и величине заряда на емкости контактных ножек держателя позволяют оценить амплитуду и длительность тока, протекающего через замкнутые контакты и вызывающего, в частности, их сваривание.

4. Уменьшение напряжения на замыкающихся контактах свидетельствует о замедлении темпа нарастания электростатической силы. Аналогичное явление следует ожидать на управляющих электродах ПЭР, защищенных от электрических пробоев по диэлектрику сопротивлением, при подаче на них импульсов управляющего напряжения.

Л и т е р а т у р а

1. РАЗУМИХИН М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. М.-Л., "Энергия", 1964.
2. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле. -В кн.: Вычислительные системы. Труды I Всесоюз. конф. по вычислительным системам. Вып. 5. Физико-технологические исследования. Новосибирск, "Наука" СО, 1968, с.159.
3. ДЯТЛОВ В.Л., ПОТАПОВ Б.С. Изыскание путей повышения параметров ПЭР. Отчет Ин-та математики СО АН СССР, 1972.
4. СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые особенности работы пленочных электростатических реле в условиях вакуума. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 43. Новосибирск, 1971, с. 160-161.
5. НОВГОРОДЦЕВА Л.З., ФАДЕЕВ С.И. Исследование нелинейных колебаний струны под действием сосредоточенных сил. -В кн.: Вычислительные системы. Вып.56, Новосибирск, 1973, с.84-101.
6. БАБАКОВ И.М. Теория колебаний. М., ГИТИЛ, 1958.

Поступила в ред.-изд.отд.

3 декабря 1975 года