

рующие устройства». Научные труды вузов Поволжья, вып. V, Куйбышев, 1970.

4. Денисов В. А., Шатерников В. Е. Метод расчета локального электромагнитного поля, щелевого токовихревого датчика. «Автоматические измерительные и регулирующие устройства». Научные труды вузов Поволжья, вып. V. Куйбышев, 1970.

А. А. РОТ, Б. И. ШХИНЕК, М. И. КАРАКОЗ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ЕМКОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМЕТРА С УЧЕТОМ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Для измерения ЭДС источников с большим внутренним сопротивлением, малых токов, зарядов, сверхбольших сопротивлений в настоящее время широко применяются электрометрические преобразователи с электростатическими измерительными механизмами — электрометрами, выполняющими функции чувствительного элемента [1, 2].

Повышение точности электрометрических преобразователей в первую очередь связано с уменьшением погрешностей электрометра, которые зависят от его конструктивных параметров. Одной из важнейших задач является определение изменения межэлектродных емкостей электрометра при различном взаимном расположении подвижного и неподвижных электродов. Такая задача решалась рядом авторов, однако при определении емкостей и расчете электростатических полей не учитывалось

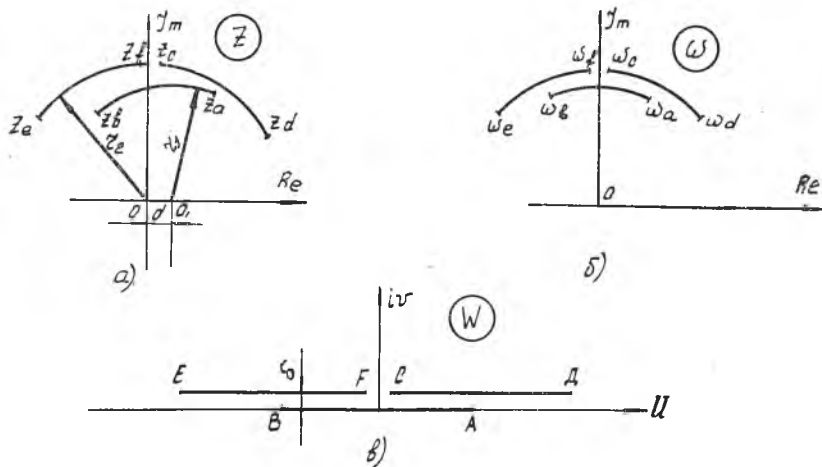


Рис. 1. Отображение дуг некоцентрических окружностей в отрезки прямых

влияние краевых эффектов вообще [2] либо учитывалось введением постоянного краевого коэффициента [1], что в общем случае приводило к значительной погрешности расчета.

Определение межэлектродных емкостей с учетом краевых эффектов сводится нами к анализу электростатических полей в электрометре при произвольной асимметрии электродов (рис. 1, а) с допущениями, сводящимися к тому, что подвижный и неподвижные электроды представляют собой параллельные цилиндры с осями в точках O и O_1 .

Такое допущение позволяет привести задачу к расчету электростатического плоско-параллельного поля, где $z_d z_c, z_e z_f$ — есть неподвижные электроды, а дуга $z_a z_b$ — подвижный электрод.

Необходимо отметить, что на рис. 1, а изображена только одна половина электрометра, расчет второй половины аналогичен первой.

Координатами точек неконцентрических окружностей $z_a, z_b, z_c, z_d, z_e, z_f$ задаемся исходя из их реального взаимного расположения в измерительном механизме.

Дробно-линейным преобразованием

$$\omega = \frac{(A+1)z - (z'_1 A + z_1)}{(A-1)z - (z'_1 A - z_1)}, \quad (1)$$

где

$$A = \sqrt{\frac{r_2^2 - (d+r_1)^2}{r_2^2 - (d-r_1)^2}}, \quad (2)$$

преобразуем неконцентрические окружности в концентрические, принимая при этом радиус окружности подвижного электрода равным 1 (рис. 1, б).

Переход от концентрических окружностей к параллельным прямым осуществляем, используя известные преобразования метода конформных отображений [3, 4], и получаем изображение полукольца на плоскости ω в виде прямоугольника на плоскости W , (рис. 1, в)

$$W = \ln \omega - i \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Таким образом получено электростатическое поле между системой электродов, представляющей отрезки прямых AB, DC, EF .

Определим поле между каждой парой пластин и методом наложения найдем результирующее поле.

Поле между пластинами AB и EF находим, исходя из следующих соображений: поскольку расстояние между пластинами значительно меньше длины их перекрытия, то расчет поля на границе F электрода EF производим без учета влияния границ E и B , считая эти точки лежащими в бесконечности.

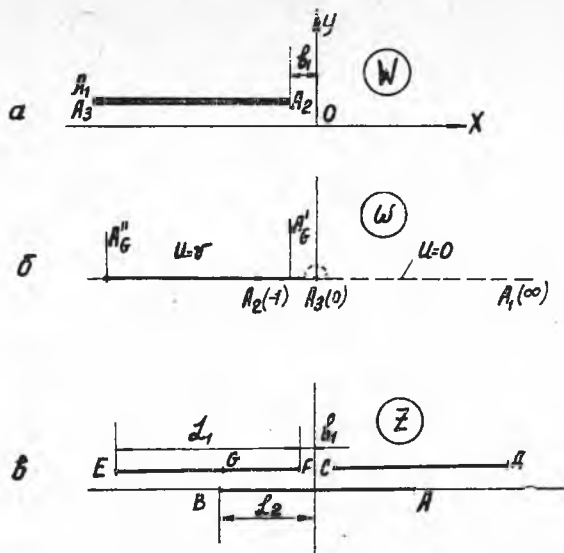


Рис. 2. Отображение вспомогательной полуплоскости в области w и z

Задача расчета такого поля и ее решение заключается в отыскании конформного отображения области z на полосу $0 < \text{Im}W < v$. Согласно изложенному выше на рис. 2, а имеется треугольная область $A_1A_2A_3$. Для отыскания обратной функции $z = z(w)$ найдем отображение вспомогательной полуплоскости $\text{Im}\omega > 0$ на полученный треугольник $A_1A_2A_3$ (рис. 2, б), имеющий следующие данные:

A_k	α_k	a
	∞	-1
	2	-1
	$-\infty$	0

Отображение полуплоскости $\text{Im}\omega > 0$ на треугольник осуществляется с помощью интеграла Кристоффеля-Шварца [4, 5], полученного для рассматриваемого случая,

$$z = c \int (\omega + 1) \omega^{-1} d\omega = c \int \frac{\omega + 1}{\omega} d\omega = c(\omega + \ln \omega) + c_1. \quad (4)$$

При

$$c = \frac{\delta}{\pi}$$

$$z = \frac{\delta}{\pi} (\omega + \ln \omega) + c_1. \quad (5)$$

Исходя из граничных условий, определяем постоянную c_1

$$c_1 = b_1 - \frac{\delta}{\pi}. \quad (6)$$

Подставив (6) в выражение (5), получим

$$z = \frac{\delta}{\pi} (\omega + \ln \omega) + \left(b_1 - \frac{\delta}{\pi} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим теперь вспомогательное отображение $Im\omega > 0$ на полосу $0 < ImW < v$, переводящее положительную полуось A_3A_1 в действительную ось $W = \frac{v}{\pi} \ln \omega$. Стсюда

$$\omega = e^{\frac{\pi W}{v}}. \quad (8)$$

Тогда выражение (7) примет вид

$$z = \frac{\delta}{\pi} \left(e^{\frac{\pi W}{v}} + \frac{\pi W}{v} \right) + \left(b_1 - \frac{\delta}{\pi} \right). \quad (9)$$

Поскольку $z = x + iy$ и $W = \rho e^{i\varphi}$ [5], то разделив вещественную и мнимую части z , получим

$$x = \frac{\delta}{\pi} (\rho \cos \varphi + \ln \rho) + \left(b_1 - \frac{\delta}{\pi} \right), \quad (10)$$

$$y = \frac{\delta}{\pi} (\rho \sin \varphi + \varphi). \quad (11)$$

Выражение (9) учитывает влияние краевого эффекта вблизи точки F (рис. 2, θ).

Легко показать, что влияние краевого эффекта вблизи точки B имеет вид

$$z_1 = \frac{\delta}{\pi} \left[\left(e^{\frac{\pi W}{v}} + \frac{\pi W}{v} \right) + \left(b_1 - \frac{\delta}{\pi} \right) \right] e^{i\pi} + (L_2 - b_1) + i\delta, \quad (12)$$

где L_2 — расстояние от мнимой оси до точки B ;

b_1 — расстояние от мнимой оси до внутреннего края неподвижного электрода (точка F);

δ — расстояние между подвижным и неподвижным электродами.

Для отображения поля на верхнюю полуплоскость найдем на плоскости ω точки, соответствующие точке G на плоскости (рис. 2, θ), положение которых определяется решением уравнения (10) при $\varphi = \pi$ относительно ρ , подставив вместо z координаты точки G .

Поскольку уравнение (10) трансцендентно относительно ρ , оно может быть вычислено численным методом с помощью ЭЦВМ.

Получив численные значения координат точки G в плоскости ω $A_{G'}$ и $A_{G''}$, определим заряд на участке GE

$$q_1 = \varepsilon \varepsilon_0 l \left| \int_{A_{G''}}^{A_{G'}} (\ln \rho)' q \rho \right| = \varepsilon \varepsilon_0 l |\ln A_{G'} - \ln A_{G''}|. \quad (13)$$

Заряд на оставшейся части пластины GF находим из подобных же соображений, подставляя в (12) координаты точки $G - A_{G^{III}}$ и $A_{G^{IV}}$

$$q_2 = \varepsilon \varepsilon_0 l \left| \int_{A_{G^{IV}}}^{A_{G^{III}}} (\ln \rho)' d\rho \right| = \varepsilon \varepsilon_0 l |\ln A_{G^{III}} - \ln A_{G^{IV}}|. \quad (14)$$

Емкость между подвижным и одним из неподвижных электродов с учетом краевых эффектов равна

$$C = \frac{q_1 + q_2}{v}. \quad (15)$$

Некоторые результаты расчета зависимостей межэлектродных емкостей от смещения подвижного электрода x при различных расстояниях между подвижным и неподвижным электродами δ и смещения внутреннего края неподвижного электрода b_1 относительно мнимой оси, определяющих в общем случае эксцентриситет системы, выполненные на ЭВМ, приведены на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при малых зазорах между электродами наиболее значительное влияние на емкость оказывает их взаимное смещение по осям, что соответствует перекосу подвижного электрода в реальной системе.

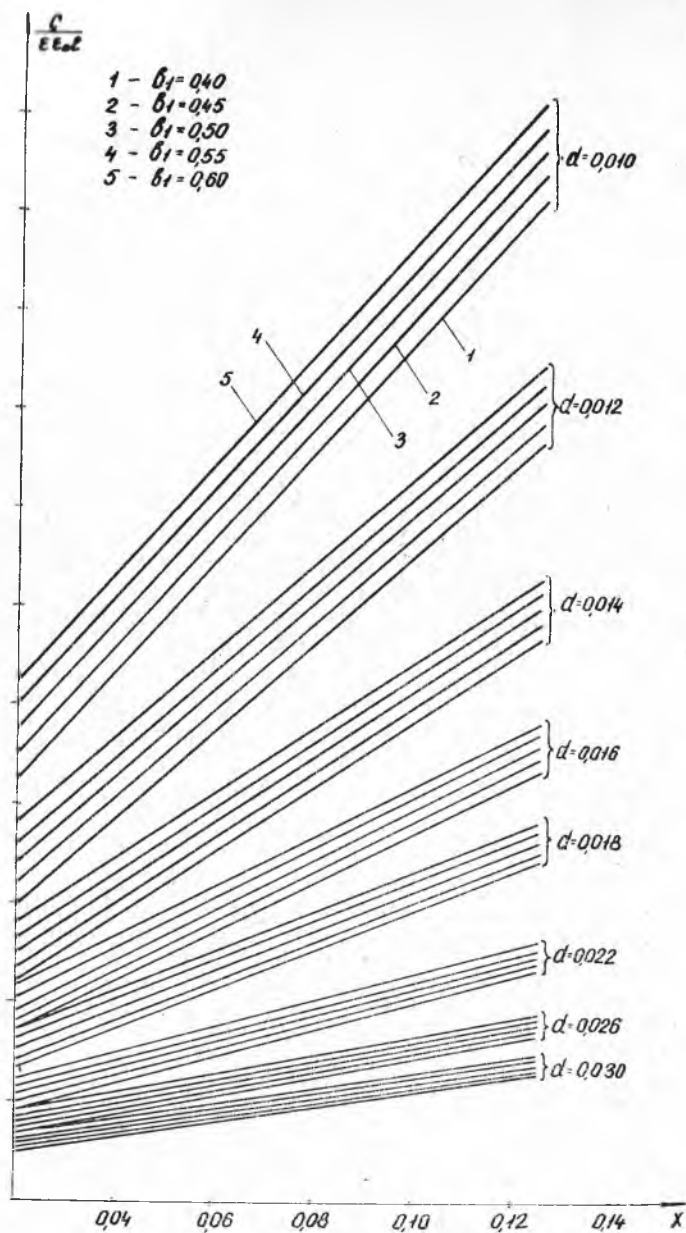
В результате проведенных исследований и анализа результатов расчета межэлектродной емкости удалось установить связь технологических допусков на конструктивные параметры цилиндрических электрометров с погрешностью электрометрического преобразователя, его чувствительностью и надежностью.

Получены аналитические выражения для вращающего момента, погрешности установки нуля прибора и чувствительности с учетом влияния краевых эффектов при различных взаимных расположениях подвижного и неподвижных электродов и эксцентриситетах.

Таким образом, данная методика расчета электростатических полей электрометра была положена в основу определения технологических допусков на обработку деталей, сборку электрометра и создание оптимальной конструкции с высокими метрологическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликовский К. Л. Электрометрические преобразователи постоянного напряжения. Изд. «Энергия», 1968.
2. Григорьев А. С. Исследование чувствительных электрометров с



Р и с. 3. График зависимости межэлектродных емкостей от смещения электродов

электростатическими измерительными механизмами. Диссертация. Куйбышевский политехнический институт, 1965.

3. Миролюбов Н. Н., Костенко М. В. Методы расчета электростатических полей. «Высшая школа», 1963.

4. Копенфельс В., Штальман Ф. Практика конформных отображений. ИИЛ, М., 1963.

5. Фукс Б. А., Шабат Б. В. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения. Физматгиз, 1964.

Г. К. АНДРОСОВ, В. В. ПОПОВА

ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЯХ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Одним из эффективных способов, широко используемых в авиационной промышленности для повышения усталостной прочности стальных деталей, является поверхностное упрочнение посредством наклепа. В результате наклепа на поверхности детали создается деформированный слой глубиной 0,4—0,8 мм, отличающийся повышенной твердостью и наличием внутренних сжимающих напряжений. Существующие методы контроля глубины наклепа и величины упругих напряжений в силу ряда причин не могут полностью удовлетворить запросы промышленности.

В настоящей работе приводятся результаты исследования возможности контроля упругих напряжений в стальных деталях магнитошумовым методом, основанным на анализе шумов циклического перемагничивания. Известно, что при перемагничивании ферромагнитных материалов наряду с обратимыми процессами смещения доменных границ и вращения векторов спонтанной намагниченности происходят и необратимые процессы скачкообразного изменения намагниченности локальных объемов [1]. В ряде работ были проведены исследования влияния упругих напряжений на спектр магнитных шумов, порождаемых скачками намагниченности, которые показали, что наличие растягивающих напряжений в ферромагнитных материалах с положительной магнитострикцией вызывает увеличение скачков Баркгаузена, а с отрицательной — уменьшение [2, 3]. К сожалению, результаты этих исследований нельзя непосредственно использовать для разработки способа контроля упругих напряжений в наклепанном слое, так как все измерения были проведены на образцах из никеля или железоникелевых сплавов, выполненных в виде длинной и очень тонкой (0,1—0,2 мм) проволоки, имеющих специфическую доменную структуру и слабо выраженное экранирующее влияние вихревых токов.

С целью максимального приближения к условиям неразрушающего контроля в данной работе использовались массивные плоские образцы размером $200 \times 80 \times 10$ мм³ из стали 30ХГСА