

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой ФМПК  
\_\_\_\_\_ Суржиков А.П.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

## **ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ**

### **Методические указания**

по подготовке и выполнению лабораторной работы по курсам  
«Физические методы контроля» для студентов направления 27.04.02 -  
«Управление качеством» и «Магнитный, электрический, вихретоковый  
контроль» для студентов направления 12.03.01 - «Приборостроение»

Томск 2017

УДК 006.915.1; 620.191

Измерение удельной электрической проводимости методом электрических потенциалов. Методические указания по подготовке и выполнению лабораторной работы по курсам «Физические методы контроля» для студентов направления 27.04.02 - «Управление качеством» и «Магнитный, электрический, вихретоковый контроль» для студентов направления 12.03.01 - «Приборостроение».

Составители: профессор кафедры ФМПК Гольдштейн А.Е.  
доцент кафедры ФМПК Калиниченко А.Н.

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании  
кафедры ФМПК «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. протокол № \_\_\_.

Зав. кафедрой ФМПК

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ А.П. Суржиков

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является знакомство с физическими основами электропотенциального преобразования, а также исследование уравнения преобразования для случая пропускания постоянного электрического тока через электропроводящую пластину малой толщины.

## ЗАДАЧИ

Задачами лабораторной работы являются:

- знакомство с математическими выражениями, описывающими зависимость разности потенциалов между двумя точками тонкой электропроводящей пластины, через которую пропускается постоянный электрический ток, от свойств пластины;
- исследование зависимости разности потенциалов между двумя точками тонкой электропроводящей пластины, через которую пропускается постоянный электрический ток, от расстояния между потенциальными электродами при фиксированном расстоянии между токовыми электродами.

### Применяемое оборудование:

- набор пластинок с разной удельной электрической проводимостью;
- вольтметр;
- блок питания;
- штангенциркуль;
- линейка металлическая измерительная 150 мм.

### **1 Математическое исследование распределения электрических потенциалов на поверхности пластины с электрическим током.**

Электропотенциальное измерительное преобразование основано на зависимости распределения электрического потенциала на поверхности объекта, по которому протекает электрический ток, от свойств этого объекта.

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками на поверхности проводника, по которому протекает электрический ток  $I$  (рис. 1), равна интегралу по некоторому пути скалярного произведения векторов  $\vec{E}$  и элементарного перемещения  $d\vec{l}$ . Напряженность поля, таким образом, является взятым с обратным знаком градиентом скалярной величины разности потенциалов (напряжения):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}; \quad \vec{E} = -\frac{d\varphi}{dl} = -grad(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.1)$$

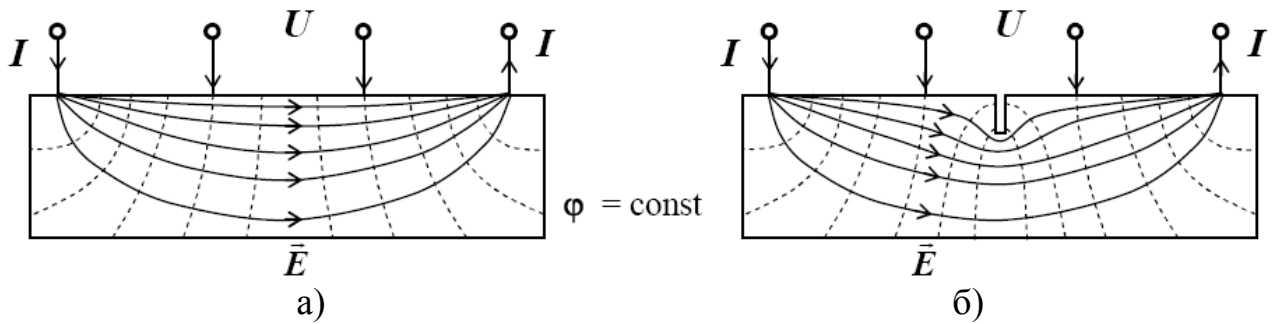


Рис. 1. Картины поля при протекании постоянного электрического тока через электропроводящую пластину при отсутствии (а) и наличии (б) неоднородности (прорези) на поверхности пластины

Следует отметить, что разность потенциалов не зависит от выбранного пути перемещения из одной точки в другую. Поверхности, находящиеся под одним потенциалом, называются эквипотенциальными. Линии в электрическом поле, касательные ко всем точкам которых совпадают по направлению с вектором напряженности поля, называются силовыми. Силовые линии всегда ортогональны эквипотенциальным поверхностям (рис. 1). По густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить об интенсивности и однородности электрического поля. Плотность электрического тока  $\vec{J}$  в проводнике прямо пропорциональна напряженности электрического поля (закон Ома):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (1.2)$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость.

Физические основы электропотенциального преобразования наиболее наглядно можно рассмотреть для случая протекания постоянного электрического тока по бесконечно длинному цилиндрическому проводнику с постоянной площадью поперечного сечения (рис. 2).

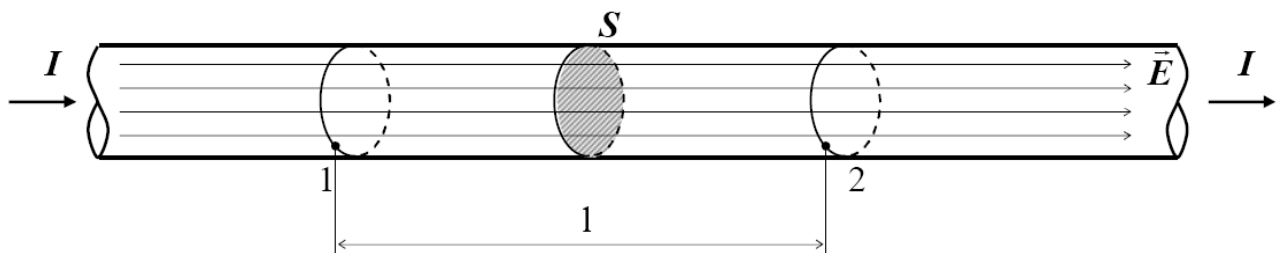


Рис. 2. Протекание постоянного электрического тока по бесконечно длинному проводнику постоянного сечения

В этом случае плотность электрического тока по сечению проводника постоянна, линии напряженности электрического поля, обеспечивающего протекание тока, параллельны образующей цилиндрической поверхности, а эквипотенциальные поверхности представляют собой плоские параллельные фигуры, перпендикулярные поверхности проводника. Зависимость разности

потенциалов между двумя точками 1 и 2 на поверхности проводника от параметров проводника:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_1^2 \frac{\vec{j}}{\sigma} \cdot d\vec{l} = \frac{I \cdot l}{S \cdot \sigma}. \quad (1.3)$$

Таким образом, разность электрических потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) между двумя точками на поверхности бесконечно длинного цилиндрического проводника постоянного сечения, по которому протекает постоянный электрический ток, прямо пропорциональна значениям тока  $I$  и расстояния между точками  $l$  и обратно пропорциональна значениям площади поперечного сечения  $S$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  материала проводника.

Данный вариант электропотенциального измерительного преобразования нашел использование главным образом для измерения удельной электрической проводимости материалов и построения так называемых реостатных измерительных преобразователей перемещений, в которых используется пропорциональная зависимость разности потенциалов или связанным с ней пропорциональной зависимостью электрическим сопротивлением от расстояния  $l$ .

Как было показано выше, вывод уравнения преобразования для случая протекания постоянного электрического тока через длинный проводник постоянного сечения не представляет каких-либо затруднений ввиду достаточно простой картины электрического поля в проводнике.

Значительно более сложное распределение электрического поля и соответственно большие затруднения представляет собой вывод уравнения электропотенциального преобразования для случая протекания постоянного электрического тока через электропроводящую пластину при относительно близком расположении токоподводящих электродов (рис. 1а) и в особенности при наличии в ней каких-либо неоднородностей (рис. 1б).

В обоих случаях электрические поля в пластине неоднородны. Поэтому взаимозависимость величин разности потенциалов  $U$ , расстояния  $l$  между точками на поверхности пластины, в которых измеряются потенциалы, площадью  $S$  поперечного сечения пластины (толщины пластины  $t$ ) носит в отличие от предыдущего случая нелинейный характер.

Нахождение распределения плотности электрического тока в пластине осуществляется в этом случае на основе решения краевой задачи, описываемой уравнениями Максвелла и граничными условиями.

На рис. 3 представлена зависимость отношения  $a \cdot \sigma \cdot U / I$  от изменения относительной толщины электропроводящей пластины  $t/a$  для различных значений отношения  $b/a$ . Здесь  $a$  – расстояние между токовым и потенциальным электродами;  $b$  – расстояние между потенциальными электродами;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость материала пластины;  $t$  – толщина пластины. С использованием этой зависимости при известных значениях тока  $I$ , межэлектродных расстояний  $a$  и  $b$ , удельной электрической проводимости материала  $\sigma$  на основе измерения разности потенциалов  $U$  может быть определено значение толщины пластины  $t$ . При известных значениях

межэлектродных расстояний  $a$  и  $b$ , толщины пластины  $t$ , тока  $I$  по результатам измерения разности потенциалов  $U$  может быть определено значение удельной электрической проводимости материала  $\sigma$ .

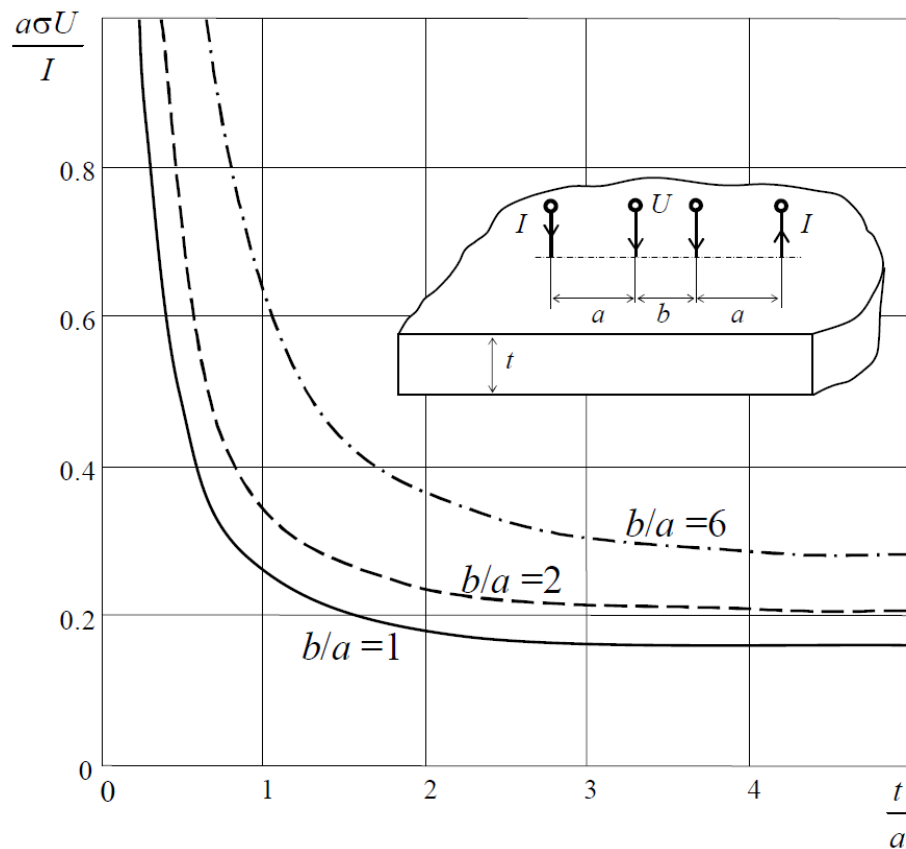


Рис. 3. Зависимость напряжения между потенциальными электродами электропотенциального измерительного преобразователя от толщины электропроводящей пластины

Для  $t/a \leq 1$  зависимости рис. 2 с погрешностью менее 10 % могут быть аппроксимированы функцией:

$$\frac{a \cdot \sigma \cdot U}{I} = \frac{a}{\pi \cdot t} \ln\left(\frac{a+b}{a}\right). \quad (1.4)$$

Для значений  $t/a > 2$  отношение  $a \cdot \sigma \cdot U/I$  и соответственно значение разности потенциалов  $U$  (при неизменных значениях других влияющих параметров) мало зависят от изменения относительного значения толщины  $t/a$ , что обусловлено резким уменьшением плотности электрического тока в слоях пластины, удаленных от поверхности на глубину большую межэлектродных расстояний. Поэтому для получения достоверной информации о толщине и электрической проводимости материала пластины при больших значениях толщины должно быть обеспечено соответствующее увеличение межэлектродных расстояний  $a$  и  $b$ .

Здесь следует отметить, что как зависимости рис. 3, так и соотношение (1.4) получены для случая пластины бесконечной площади, т.е. в предположении, что края пластины находятся бесконечно далеко от точек установки электродов. В реальном же случае такое допущение можно использовать при расстоянии точек установки электродов от края пластины превышающем расстояние между токовыми электродами. Причем наибольшее отличие реальных зависимостей от теоретических имеет место при расположении линии установки электродов параллельно краю пластины.

## 2 Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить образцы к контролю.

2.2. Произвести предварительную разметку образцов (в случае необходимости).

2.3. Измерить разность потенциалов на образцах в виде полоски при  $I = 3 \text{ А}$ ,  $l = 50 \text{ мм}$  ( $l$  – расстояние между потенциальными электродами).

2.4. Измерить разность потенциалов на образцах в виде полоски при  $I = 3 \text{ А}$ ,  $l = 150 \text{ мм}$ .

2.5. Измерить разность потенциалов на образцах в виде полоски при  $I = 5 \text{ А}$ ,  $l = 150 \text{ мм}$ .

2.6. Вычислить удельную электрическую проводимость образцов и данные записать в таблицу.

№ образца	$I = 3 \text{ А}, l = 50 \text{ мм}$		$I = 3 \text{ А}, l = 150 \text{ мм}$		$I = 5 \text{ А}, l = 150 \text{ мм}$		$\sigma_{\text{усред}}, \text{ МСм}$
	U, мВ	$\sigma$ , МСм	U, мВ	$\sigma$ , МСм	U, мВ	$\sigma$ , МСм	
1							
2							
3							
4							
5							

2.7. Измерить разность потенциалов на образце в виде пластины при  $I = 5 \text{ А}$ . Измерения провести в центре и по краям образца (перпендикулярно и параллельно кромке).

2.8. Вычислить толщину образца в виде пластины. Сравнить полученные данные с реальной толщиной образца.

2.9. Используя выражение (1.4) постройте графики зависимости разности потенциалов от толщины пластины  $U(t)$  при фиксированных значениях силы тока  $I = 3 \text{ А}$ ; удельной электрической проводимости  $\sigma = 7,5 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ ; расстоянии между токовым и потенциальным электродом  $a = 10^{-2} \text{ м}$  и трех значениях расстояния между потенциальными электродами  $b_1 = a$ ;  $b_2 = 2a$ ;  $b_3 = 4a$ . Диапазон изменения толщины целесообразно выбрать  $t = (0,1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-3}) \text{ м}$  с шагом изменения  $0,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

2.10. Используя выражение (1.4) постройте графики зависимости разности потенциалов от удельной электрической проводимости пластины  $U(\sigma)$  при фиксированных значениях силы тока  $I = 3 \text{ А}$ ; толщины пластины  $t = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; расстояния между токовым и потенциальным электродом  $a = 10^{-2} \text{ м}$  и трех значениях расстояния между потенциальными электродами  $b_1 = a$ ;  $b_2 = 2a$ ;  $b_3 = 4a$ . Диапазон изменения удельной электрической проводимости в этом случае целесообразно выбрать ( $1 \cdot 10^6 \dots 10 \cdot 10^6$ ) См/м, с шагом изменения  $0,1 \cdot 10^6$  См/м.

2.11. Проанализируйте построенные графики. Дайте им физическое толкование.

### **3 Контрольные вопросы**

3.1. Почему эквипотенциальные линии и линии напряженности электрического поля всегда перпендикулярны друг другу?

3.2. Почему по густоте эквипотенциальных линий можно судить о напряженности электрического поля?

3.3. Что такое плотность тока?

3.4. Как влияет толщина пластины, по которой пропускается электрический ток, на картину электрического поля?

3.5. Зависит ли от расположения токоподводящих электродов на поверхности изделия картина электрического поля?

3.6. Как сказывается на картине электрического поля приближение электродов к краям пластины?

3.7. Почему влияние края пластины на результат преобразования больше для случая расположения линии установки электродов параллельно краю пластины по сравнению с ее расположением перпендикулярно краю?