

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СКАНИРОВАНИЯ ТОЛСТОПЛОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ ПОДГОНКИ

Е.В. Шабдаров (Поволжский государственный технологический университет)

*Предлагается решение, повышающее эффективность проведения экспериментальных исследований влияния подгонки толстопленочных резисторов на функциональную характеристику и распределение потенциала с использованием технологий National Instruments. Выделяются и описываются характерные особенности аппаратно-программного комплекса для сканирования резистивных элементов. Особое внимание акцентируется на анализе различий получаемых характеристик резистивных элементов вследствие электроискровой и лазерной подгонки.*

*Ключевые слова: толстопленочные резисторы, сканирование, подгонка резисторов, функциональная характеристика, распределение потенциала.*

### Введение

В век информационно-цифровых технологий основными электронными компонентами являются интегральные схемы, которые состоят из активных и пассивных элементов. Однако, учитывая, что объемы выпуска современной радиоэлектронной аппаратуры исчисляются миллионами единиц, производство пассивных компонентов с каждым годом увеличивается на 10...20% [1]. Одним из таких компонентов является резистор.

Резисторы классифицируются по многим признакам, в соответствии с которыми применяются различные технологии изготовления. В связи с активным развитием технологий создания резистивных элементов широкое распространение получила толстопленочная технология. Резистивные компоненты, изготавливаемые по керметной толстопленочной технологии, в настоящее время являются наиболее массовыми. Это связано с достаточно низкой ценой на данные пассивные изделия электронной техники при одновременно высоких электрических и эксплуатационных характеристиках.

По толстопленочной технологии изготавливают постоянные, переменные и подстроечные резисторы, составляющие неотъемлемую часть любой электронной схемы. Самым распространенным электронным компонентом, применяемым в любой схеме, является постоянный резистор. Переменные резисторы, главным образом, применяются для настройки и регулировки сигналов: в качестве регуляторов громкости, тембра, уровней, настройки на частоту и т.д. Подстроечные резисторы применяются в схемах радиоэлектронных устройств для того, чтобы обеспечить их настройку во избежание многократных замен, связанных с необходимостью подбора постоянного резистора.

Несмотря на то, что переменные и подстроечные резисторы могут изменять величину регулируемого сопротивления от практически нулевого до номиналь-

ного, они также имеют достаточно жесткий допуск на величину номинального сопротивления, не превышающий обычно  $\pm 10\%$ . Одним из слабых мест толстопленочной технологии является широкий разброс номиналов пассивных компонентов, достигающий  $\pm 20\%$ . При ужесточающихся требованиях к величине допустимого отклонения это серьезным образом сказывается на выходе годных изделий. Поэтому для повышения точности и выхода годных резистивных элементов на производстве прибегают к различным методам и средствам корректировки величины сопротивления.

Среди таких методов подгонки наиболее известными являются лазерная, токовая, механическая, подгонка факельным разрядом [2], электроискровая подгонка, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Большинство из них связаны с нарушением резистивного слоя, вызванного изменением геометрических размеров, либо термическим воздействием. На сегодняшний день для подгонки толстопленочных резисторов в промышленности в большинстве случаев используется лазер с различной конфигурацией реза [3, 4]. Это обусловлено простотой реализации, высокой производительностью, точностью подгонки и освоенностью технологии. Однако лазерная подгонка разрушает резистивный слой, выжигая его. Это является приемлемым для постоянных резисторов, но для переменных резисторов и резистивных датчиков лазерное воздействие является губительным, поскольку нарушается функциональная характеристика (ФХ) резистора. ФХ показывает характер изменения сопротивления вдоль резистивного слоя, в том числе и от угла поворота в случае резистора подковообразной формы.

Для решения этой проблемы на кафедре «Конструирования и производства радиоаппаратуры» Поволжского государственного технологического университета был разработан метод электроискровой подгонки (ЭИП) резисторов, заключающийся в воздействии

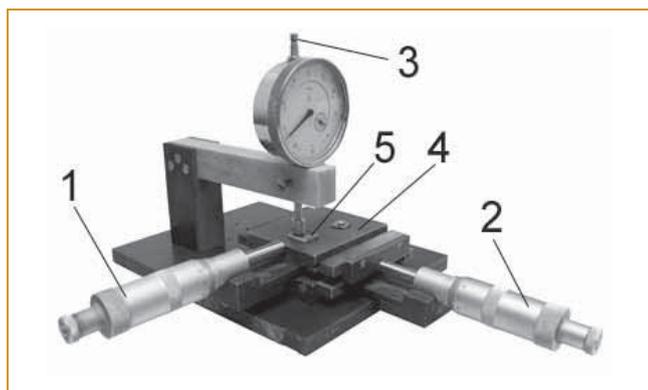


Рис. 1. Устройство для ручного сканирования резистивной пленки, где 1, 2 – микрометрические винты; 3 – направляющая для вертикального перемещения щупа; 4 – координатный столик; 5 – сканируемый образец

на резистор электроискрового разряда [5]. Под действием электроискрового разряда происходят структурные изменения в пленке, что приводит либо к увеличению, либо к уменьшению сопротивления в зависимости от вида резистивного материала и режимов подгонки. Метод ЭИП может быть применен успешно для подгонки постоянных резисторов. Однако применимость электроискрового метода для подгонки переменных резисторов изучена не в достаточной степени. Причиной этому являлось отсутствие соответствующих средств для исследования влияния ЭИП на ФХ и распределение полей в резистивном слое.

Целью данной работы является разработка комплекса средств для автоматизированного исследования влияния подгонки на функциональную характеристику и распределение электрического потенциала по площади резисторов.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка аппаратных средств исследования пленочных резисторов;
- разработка программных средств управления установкой, измерения, сбора и автоматической обработки данных;
- исследование влияния различных типов подгонки на функциональную характеристику и распределение электрического потенциала по площади резисторов.

#### Особенности реализации аппаратных средств

При проектировании аппаратно-программного комплекса особое внимание уделялось способу полу-

чения данных для построения ФХ и распределения потенциала. Существуют различные способы измерения электрического потенциала на поверхности пленочных резисторов [6], большинство из которых ориентированы на измерение удельного поверхностного сопротивления резистивного материала. А при исследовании резистивного слоя после подгонки необходимым условием является возможность измерения потенциала в каждой точке исследуемой поверхности. Для решения поставленных задач было принято решение применить однозондовое измерение, поскольку оно позволяет измерить потенциал в любой точке резистивного слоя. Последовательное измерение потенциала по всей площади резистивного материала принято называть сканированием. Подобного рода исследования требуют значительных временных затрат, поэтому главным критерием при

конструировании оборудования была автоматизация процесса измерения. Ранее для проведения подобного сканирования использовалась механическая система перемещения с ручным управлением, показанная на рис. 1 [7]. Ручное сканирование требовало много времени. Для проведения 1000 измерений требовалось  $90 \pm 10$  мин. Последующая обработка данных, заключающаяся в упорядочении полученных значений и построении графиков, занимала  $\geq 1$  ч. Это сильно ограничивало проведение исследований.

Решение подобной проблемы связано с сокращением временных затрат на проведение сканирования. Это диктует необходимость применения современных компьютерных технологий совместно работающих с аппарат-

ными средствами. Для решения поставленных выше задач по исследованию поверхности толсто пленочных резисторов разработана экспериментальная установка, функциональная схема которой изображена на рис. 2.

Наиболее распространенные типы конструкций резистивных элементов представляют собой прямоугольную (характерную для постоянных и переменных резисторов) и подковообразную (характерную для переменных резисторов и резистивных датчиков) формы. Поэтому в основу системы сканирования заложена не только координатная система перемещения по осям X и Y, но и поворотная платформа, способная вращаться вокруг своей оси. Необходимым условием при перемещении координатной системы является точное позиционирование. Для этой цели были использованы шаговые двигатели (ШД) 17HS5425 с угло-

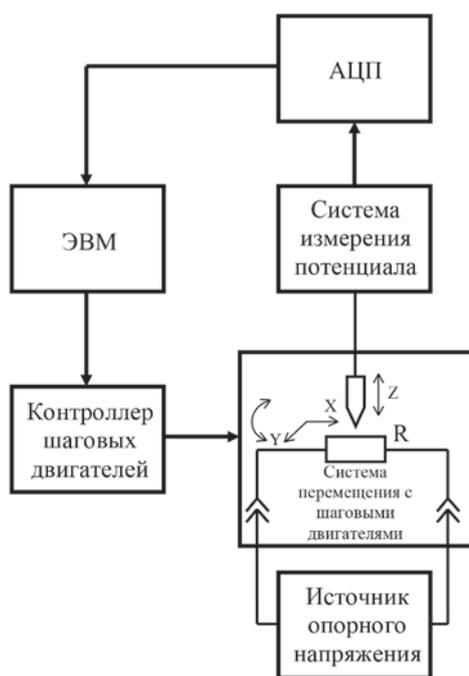


Рис. 2. Функциональная схема установки

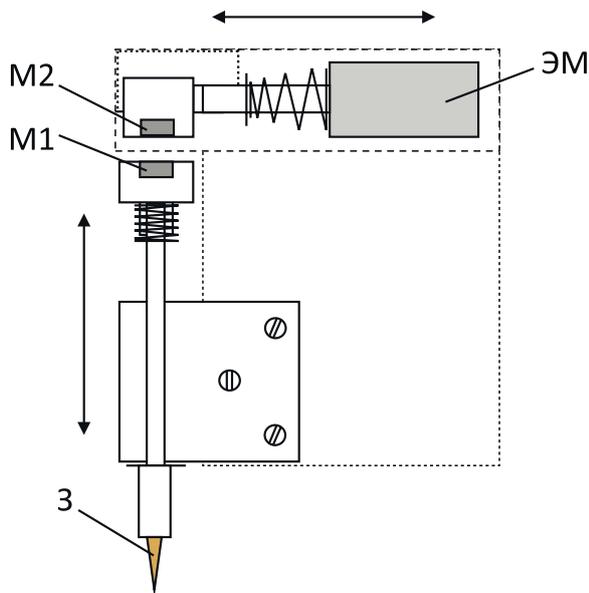


Рис. 3. Система позиционирования измерительного зонда

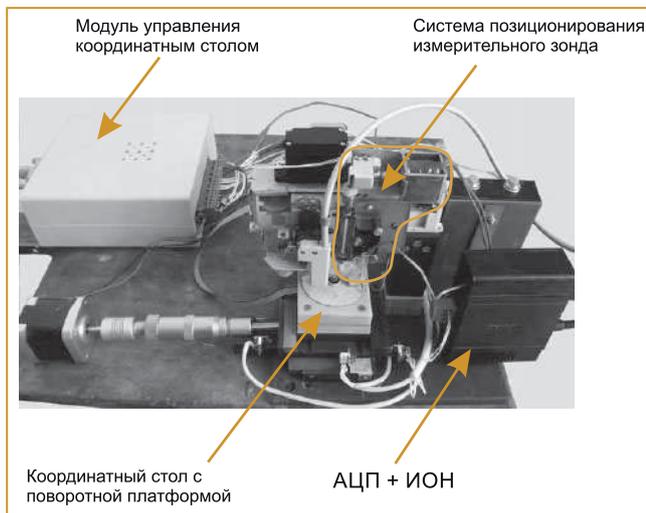


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования распределения потенциала по площади резистора при электроискровой подгонке

вым шагом 1,8°. Для подключения ШД применен контроллер, построенный на базе микросхемы Toshiba TV6560ANQ. Контроллер позволяет управлять системой перемещения, взаимодействуя с компьютером посредством его параллельного порта. Механическое соединение ШД с координатным столом посредством микрометрических винтов позволило увеличить точность позиционирования резистора относительно измерительного зонда. В полшаговом режиме работы ШД дискретность шага составляет 4 мкм, что является более чем достаточным при сканировании резисторов.

Одной из проблем при сканировании резисторов является погрешность измерения потенциала, которая напрямую зависит от стабильности источника опорного напряжения (ИОН). В качестве ИОН использована микросхема ADP2118, которая способна преобразовать напряжение из 5 в 1 В, требуемое для подключе-

ния к контактам резистора. Микросхема представляет собой высокостабильный преобразователь напряжения на основе ШИМ, а благодаря цепи обратной связи максимальная погрешность выходного напряжения составляет  $\leq 0,5\%$ , что укладывается в пределы  $1000 \pm 5$  мВ. Использование напряжения 1 В обусловлено снижением влияния температурного коэффициента сопротивления (ТКС) резистора вследствие нагрева резистивного материала при протекании электрического тока, а также удобством расчета поверхностного удельного сопротивления. Кроме того, любой резистор является источником шумов, обусловленных тепловым движением носителей зарядов (электронов). Измерение тепловых шумов основывается на теории тепловых шумов Найквиста. Связь между сопротивлением  $R$  и напряжением тепловых шумов  $U_{ш}$ , описывается формулой Найквиста, которая в простейшем случае выглядит следующим образом:

$$U_{ш}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура образца;  $\Delta f = f_v - f_n$  — диапазон частот между высшей и низшей частотой, в полосе которых определяется шум [8].

Из (1) видно, что шумы возрастают прямо пропорционально температуре. Вследствие приложения низкого напряжения, токи не вызывают нагрев резистивного слоя и влияние тепловых и токовых шумов на результаты измерения минимальны. У непроволочных резисторов токовые шумы значительно больше тепловых. Общий уровень шума для разных типов резисторов находится в диапазоне 0,1...100 мкВ/В.

Для измерения потенциала используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), позволяющий измерять напряжение с высокой скоростью и передавать полученное значение в ПК. Поскольку уровень напряжения мал, влияние внешних помех на измеряемую величину может сказаться в значительной мере, и погрешность измерения может быть высокой. Поэтому для предотвращения влияния помех АЦП построен на высокоскоростном контроллере с тактовой частотой 32 МГц.

Тактовая частота модуля АЦП с заданным пределителем на 64 при этом составляет:

$$F_{ADC} = \frac{F_{CPU}}{PRE} = \frac{32000000}{64} = 500000 \text{ Гц},$$

где  $F_{CPU}$  — тактовая частота микроконтроллера, Гц;  $PRE$  — делитель модуля АЦП.

Частота измерений, с учетом числа тактов для одного измерения, согласно спецификации на микроконтроллер, составляет:

$$F_D = \frac{F_{ADC}}{n} = \frac{500000}{13} = 38461 \text{ Гц},$$

где  $F_D$  — частота дискретизации, Гц;  $n$  — число тактов.

Таким образом, временной интервал между измерениями составляет  $T = 1/F_D = 26$  мкс. Многократное

измерение с последующим усреднением позволяет существенно снизить погрешность измерения, вызванную различными электромагнитными воздействиями на схему измерения, в состав которой входит система позиционирования измерительного зонда (рис. 3).

Система позиционирования включает зонд 3, обеспечивающий контакт с резистивным материалом. Система поднятия — опускания зонда состоит из двух магнитов M1 и M2, притягивающихся друг к другу, и втягивающего электромагнита ЭМ.

Во время сканирования зонд 3 перемещается по вертикали, а система перемещения с шаговыми двигателями смещается по траектории сканирования резистивного слоя. Во время работы для осуществления измерения потенциала на поверхности резистора электромагнит ЭМ втягивается, магнит M2 смещается, а зонд 3 опускается под действием собственного веса. Такая система позволяет опускать зонд 3, не разрушая резистивную пленку, так как вес опускающейся части мал, а также устраняет необходимость постоянной подачи питающего напряжения на электромагнит для удержания зонда 3 во время перемещения.

Для обработки измеренных АЦП значений данные передаются в программу сканирования резисторов по шине USB. На рис. 4 представлена экспериментальная установка для исследования резисторов.

При исследовании резисторов сканированием до и после подгонки анализируются:

- 1) распределение потенциала вдоль резистора, которое отражается в виде ФХ;
- 2) распределение потенциала по всей площади резистора.

ФХ для прямоугольных резисторов анализируется как зависимость сопротивления, выраженного в % от его максимального значения, от длины резистивного слоя, а для переменных резисторов — как зависимость сопротивления, выраженного в % от его максимального значения, от угла поворота подвижного контакта.

#### Особенности реализации программной части

При проектировании программной части экспериментальной установки использовалась среда программирования LabVIEW [9].

Алгоритм работы программных средств, связанных с проведением эксперимента, обработки и представления результатов экспериментальных исследований может быть представлен в следующем виде:

- 1) калибровка системы перемещения;

- 2) тестирование измерительно-регистрающего тракта;
- 3) ввод параметров исследуемого образца и сканирования;
- 4) проведение измерений и сбор данных;
- 5) обработка результатов измерений;
- 6) сохранение результатов экспериментального исследования для дальнейшего анализа.

Рассмотрим особенности работы программного обеспечения на всех этапах проведения исследования. Калибровка программы выполняется единожды и каждый раз при изменении режима работы шаговых

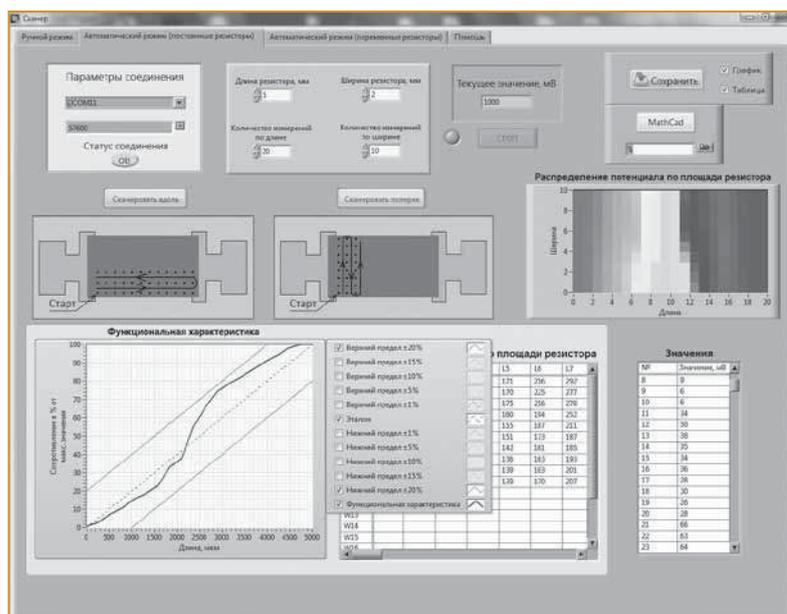
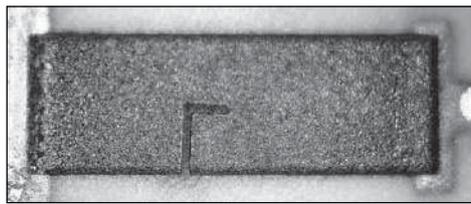


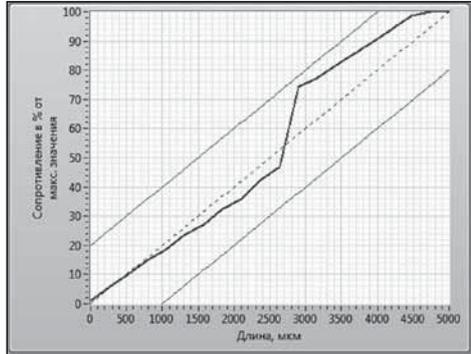
Рис. 5. Фрагмент виртуального прибора экспериментального исследования распределения потенциала по площади прямоугольного резистора и его ФХ в среде LabVIEW



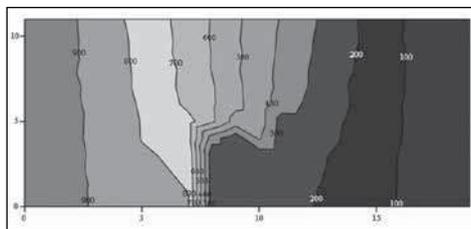
Рис. 6. Фрагмент виртуального прибора экспериментального исследования распределения потенциала по площади подковообразного резистора и его ФХ в среде LabVIEW



а)



б)



в)

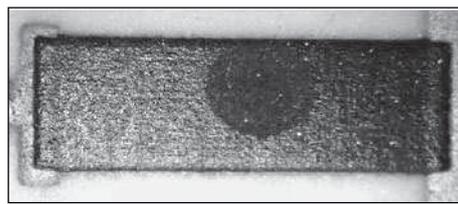
Рис. 7. Толстопленочный резистор после лазерной подгонки (а), его ФХ (б) и диаграмма распределения потенциала (в)

двигателей. Калибровка включает настройку регистров параллельного порта, датчиков системы перемещения и настройку осей.

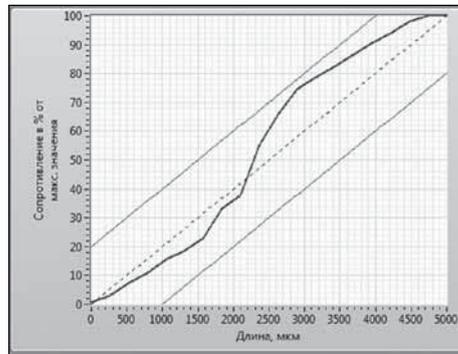
Тестирование измерительно-регистрирующего тракта выполняется в ручном режиме. Оно включает выравнивание исследуемого резистора по осям (для прямоугольных резисторов), установку измерительного зонда в начальную позицию и проведение пробных измерений. Позиционирование переменных резисторов на поворотной платформе осуществляется за счет фиксирующего штыря, расположенного на оси вращения платформы.

На этапе ввода входных данных выставляются параметры измеряемого образца (длина, ширина, угол поворота (для переменных резисторов)), параметры соединения с устройством сканирования (число измерений по длине и ширине резистора).

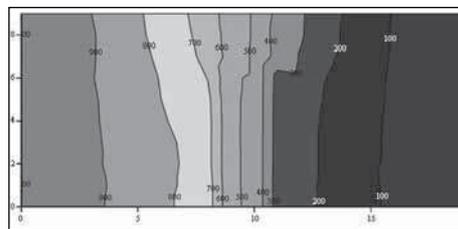
Проведение измерений заключается в регистрации потенциала в каждой точке сканирования, расположенной согласно траектории движения координатного стола. Траектория движения и шаг измерений выступают в качестве начальных параметров. Для прямоугольных резисторов возможны две траектории сканирования: поперек и вдоль резистора (рис. 5). В случае подковообразных резисторов траектория



а)



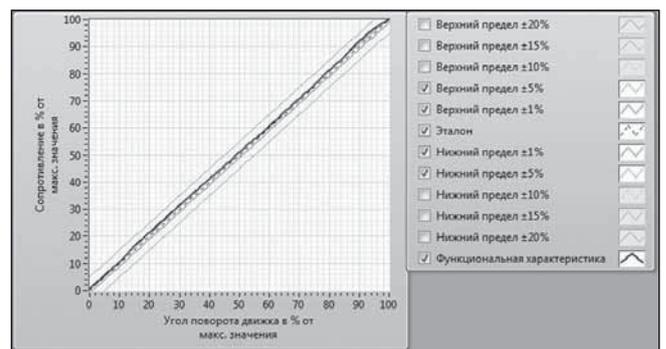
б)



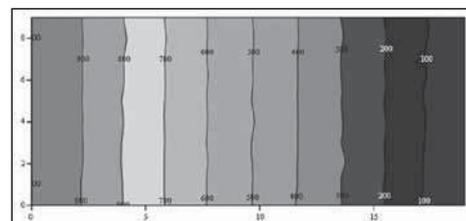
в)

Рис. 8. Толстопленочный резистор после высокочастотной электроэрозионной подгонки (а), его ФХ (б) и диаграмма распределения потенциала (в)

и табличных данных в формате XLS (для таблицы рас-



а)



б)

Рис. 9. Линейная ФХ (а) и диаграмма распределения потенциала (б) толстопленочного

сканирования представляет собой движение вдоль резистора (рис. 6).

Данные измерений обрабатываются и представляются в виде массива чисел, соответствующих траектории сканирования. По результатам измерений строится график ФХ резистора. Для более детального анализа строится диаграмма распределения потенциала по площади резистора, которая показывает изменение сопротивления в каждой точке измерения (рис. 7, в). Эти данные позволяют произвести оценку степени влияния того или иного воздействия на резистивный слой. Данные приведены для прямоугольного резистора сопротивлением 6,8 кОм, подвергнутого лазерной подгонке в виде L-реза.

Программа позволяет выявлять отклонения ФХ с линейной зависимостью от расчетного значения в соответствии с рядами, установленными в ГОСТ 10318-80 «Резисторы переменные».

Полученные данные сохраняются в виде картинки в формате PNG (для ФХ)

пределения потенциала). Для построения диаграммы распределения потенциала по площади резистора возможен экспорт данных в программу MathCad с последующим автоматическим построением диаграммы и сохранением в формате RTF. Это позволяет легко вставлять результаты исследования в отчет. Диаграмма, построенная в MathCad, представлена на рис. 7 (в). Диаграмма распределения представляет собой набор эквипотенциальных линий (образованы областью с одинаковым потенциалом), окрашенных разным цветом, а их границы характеризуют распределение потенциала. Число линий может быть изменено, например, увеличение позволяет провести более детальный анализ распределения потенциала. На рис. 7 (в) диаграмма показывает резкий скачок значения потенциала в месте L-реза. Характер такого изменения говорит о выжигании резистивного слоя, но поскольку граница нечеткая, часть резистивного материала в месте реза осталась.

Вкладка «Помощь» содержит справочные данные, соответствующие ГОСТы (ГОСТ 10318-80 «Резисторы переменные. Основные параметры», ГОСТ 21342.3-87 «Резисторы переменные. Методы проверки функциональной характеристики», ГОСТ 24237-84 «Резисторы переменные непроволочные. Общие технические условия») и теоретические сведения о подгонке и сканировании резисторов.

На рис. 8 (а) изображен резистор после экспериментальных исследований формы электроискрового разряда. Ввиду высокой частоты разряда, подгонка носила разрушительный характер, вследствие чего на поверхности видна область воздействия, а ФХ (рис. 8, б) и распределение потенциала (рис. 8, в) сильно искажены.

Для подгонки переменных резистивных элементов основным требованием является сохранение линейности ФХ (рис. 9, а). Сравнивая линейную ФХ (рис. 9, а) с характеристикой после подгонки (рис. 7, б, рис. 8, б) можно сказать, что разные виды воздействия на поверхность резисторов, в той или иной степени, нарушают распределение потенциала, вызывая искажения ФХ. Это может быть вызвано как изменением геометрической формы резистивного слоя (рис. 7, а), так и структурными изменениями (рис. 8, а), вызванными различными факторами, такими как, продолжительное воздействие на одну область, форма разряда в виде плазменного шнура (дуговой разряд).

Из рисунков видно, что ФХ показывает лишь общий характер изменения потенциала, поэтому построение диаграммы распределения является неотъемлемой частью исследования резисторов.

#### Выводы

Таким образом, разработанное техническое решение позволяет существенно сократить время на проведение эксперимента. Если для ручного сканиро-

вания при выполнении 1000 измерений требовалось минимум 150 мин, то для автоматизированного сканирования требуется  $\leq 15$  мин при том же числе измерений. Установка также освобождает исследователя от выполнения рутинных работ по регистрации и обработке полученных данных. Разработанное техническое решение позволяет выполнять многократные исследования состояния резистивной пленки в процессе электроискровой подгонки резисторов без значительных временных затрат.

Аппаратно-программный комплекс был протестирован при исследовании влияния различных типов подгонки (лазерная подгонка, электроискровая подгонка) на резистивный слой толсто пленочных резисторов прямоугольной (резистивные блоки Б19 К) и подковообразной (подстроечные резисторы СПЗ-44 а) формы. В результате чего были построены ФХ и распределение потенциала по площади резистора, наглядно показывающие характер изменения сопротивления вдоль резистивного слоя. Лазерная подгонка вызывает более резкое изменение потенциала из-за выжигания резистивного слоя (рис. 7, в), а ЭИП — менее резкое изменение, поскольку происходят структурные изменения в резистивном слое (рис. 8, в).

#### Список литературы

1. Недорезов В.Г. Резисторы и их классификация //Тр. международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2006. Т. 1. С. 150.
2. Piganov M.N. et al. Device for fitting thick-film resistors // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2014. vol. 44, Issue 2. p. 61-67.
3. Sandborn P., Sandborn P.A. A random trimming approach for obtaining high-precision embedded resistors //IEEE Transactions on Advanced Packaging. 2008. vol. 31. no. 1. pp. 76-81.
4. Wronski M. et al. New trim configurations for laser trimmed thick-film resistors — theoretical analysis, numerical simulation and experimental verification //Microelectronics Reliability. 2005. vol. 45. no. 12. pp. 1941-1948.
5. Леухин В.Н., Шабдаров Е.В., Блинов И.Д. Технология электроискровой подгонки резисторов // Тр. ПГТУ. Сер.: Технологическая. Вып. 3. Йошкар-Ола: ПГТУ. 2015. С. 99-104.
6. Шабдаров Е.В. Методы и средства исследования распределения электрического потенциала по поверхности резистивной пленки // Тр. IX международной молодежной науч. конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. Ч.2. С. 254-256.
7. Нагаев А.А. Влияние электроискровой подгонки на распределение электрических полей в пленочном резисторе // Технические науки: проблемы и перспективы. 2011. С. 117-121.
8. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 488 с.
9. Трэвис Д., Кринг Д. LabVIEW для всех. Уч. пособие. ДМК Пресс. 2011.

**Шабдаров Евгений Васильевич** — аспирант Поволжского государственного технологического университета.

Контактный телефон +7(937)939-49-91.

E-mail: shabdarov2010@yandex.ru