

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'В. Кондрашов', is centered on the page.

Кондрашов Владимир Владимирович

Управление процессом  
лазерной подгонки плёночных резистивных элементов  
на основе сеточной схемной модели токопроводящей среды

Специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и  
обработка информации» (промышленность)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
Лукашенко Анатолий Викторович

**Официальные оппоненты:**

Разинкин Владимир Павлович, доктор  
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Новосибирский государственный техни-  
ческий университет», профессор кафедры  
«Теоретические основы радиотехники»

Антонов Юрий Николаевич, кандидат  
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Ульяновский государственный техниче-  
ский университет», доцент кафедры  
«Экономика, управление и информатика»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего об-  
разования «Санкт-Петербургский нацио-  
нальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
оптики», г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 05 » октября 2016 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертацион-  
ного совета Д 212.271.05 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный универси-  
тет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Туль-  
ский государственный университет» ([www.tsu.tula.ru](http://www.tsu.tula.ru)).

Автореферат разослан « 03 » августа 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Соколова  
Марина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Лазерная подгонка (нормирование) плёночных резистивных элементов (РЭ) путём изменения их конфигурации является одним из наиболее часто используемых методов настройки электрических параметров схем в микроэлектронике. В этом случае конечный результат – сопротивление, точность, стабильность резистора – зависит от параметров лазерного реза: его длины и ширины, конфигурации и ориентации на теле РЭ.

Даже при использовании современных автоматизированных установок технолог или оператор вынуждены выполнять значительный объём рутинной работы по анализу ситуаций в ходе технологического процесса и выбору параметров обработки задания для каждого конкретного резистора. Это является несомненным недостатком подобных систем и приводит к чрезмерно высокой трудоёмкости и технологической сложности операции подгонки, снижению процента выхода годных изделий, а также отрицательно влияет на временную и температурную стабильность параметров РЭ. Особенно это характерно для гибридных интегральных схем (ГИС) с высокой сложностью топологического рисунка, а также при производстве прецизионных плёночных элементов. Дополнительные осложнения возникают из-за несовершенства технологии изготовления или небольших отступлений от технологических требований или конструкторской документации (КД).

В связи с этим следующим этапом совершенствования установок лазерной подгонки резисторов является внедрение механизмов анализа и принятия решений на основе результатов предварительного моделирования процесса подгонки с минимальным участием оператора либо полностью в автоматическом режиме. Для построения соответствующей современным требованиям системы управления процессом лазерной подгонки необходимо получение как первичных сведений о требованиях к конкретному изделию из электронных файлов КД, так и максимально полной информации о ходе технологического процесса, получаемых в режиме реального времени. В настоящий же момент в качестве обратной связи выступает лишь текущее измеряемое значение сопротивления. Очевидно, что в такой ситуации невозможен объективный оптимальный выбор параметров подгоночного реза и управляющего воздействия в целом ни оператором, ни тем более автоматически.

При синтезе алгоритмов управления процессом подгонки необходимо учитывать такие изменяющиеся данные, как координаты места расположения пятна лазерного излучения и сопротивление резистора в текущий и предыдущие моменты времени. Знание проектной топологии и анализ в режиме реального времени измеряемых параметров позволят с большой точностью прогнозировать ситуацию и качественно моделировать процесс либо оптимизировать его по заданным технологией критериям.

По разным причинам геометрические размеры резисторов и их расположение относительно реперных (базовых) меток могут не совпадать с заложенными в КД. Аналогичной может быть ситуация и с фактическим положением или размером сфокусированного лазерного пятна на подложке. Поскольку геометрические размеры РЭ и диаметр пятна лазерного излучения являются важнейшими исходными данными для построения модели резистора, очевидна необходимость анализа реального расположения платы на основе видеоинформации. При этом следует учесть, что использование стандартных алгоритмов машинного зрения нередко бы-

вадет затруднено спецификой изображений платы с топологическим рисунком на установках с современными оптическими системами и условиями их эксплуатации – значительная дисторсия, нарушение экспозиции, частичная расфокусировка.

Таким образом, можно сделать вывод, что задача построения системы лазерной подгонки плёночных РЭ на основе синтеза новых моделей и алгоритмов управления не только актуальна как научная задача, но и требует комплексного подхода, опирающегося на современные методы получения, анализа информации и принятия решений. Только при чётком понимании этого возможно получение таких алгоритмов управления данным процессом, которые смогут обеспечить требуемую для решения современных задач микроэлектроники и точного резисторостроения прецизионность результатов, повышая при этом процент выхода годных изделий и максимально исключая человеческий фактор.

**Степень разработанности.** Задачам повышения стабильности характеристик РЭ после подгонки посвящен ряд работ К. Шимманца (K. Schimmanz), исследовавшего влияние различных лазерных резов на долговременный дрейф сопротивления резисторов как следствие трещинообразования в зоне, прилегающей к резу. В ряде работ К. Шимманц совместно с А. Костом (A. Kost) рассматривают использование метода конечных элементов для решения задачи моделирования подгоночных резов с целью предсказания образования на теле резистора участков с повышенной плотностью тока.

Методы расчёта сопротивления резисторов при их проектировании и подгонке рассматривались в работах В.П. Вейко, J. Ramires-Angulo, R.L. Geiger, E. Sanchez-Sinencio, Phillip и Peter A. Sandborn, Rocky Hilburn, Craig Hasegawa, Jiangtao Wang.

Из отечественных работ, посвящённых моделированию плёночных резисторов, можно выделить работы Ю.Н. Антонова, М.Г. Рубановича, В.Н. Бугрова, В.Д. Садкова. Ю.Н. Антонов в своих трудах затрагивает широкий круг вопросов и задач, касающихся лазерной подгонки резисторов: физико-математические модели, концепции управления технологическим процессом, разработка программного обеспечения. В свою очередь, М.Г. Рубанович рассматривает электромагнитное моделирование мощных плёночных РЭ в сверхвысокочастотных схемах, учитывая распределение ёмкости и индуктивности в поперечном сечении резистора. Труды В.Н. Бугрова посвящены синтезу конфигурации плёночных РЭ с требуемой функцией дискретной подстройки на основе математических моделей. В работах В.Д. Садкова сделан акцент на построении моделей РЭ методом конформных отображений.

Основываясь на результатах работ вышеперечисленных авторов, можно перейти к задачам следующего уровня, что позволит решать как конструкторские вопросы разработки и производства современного оборудования для лазерной подгонки, так и актуальные технологические проблемы в резисторостроении. В связи с этим были сформулированы цель и задачи исследования.

**Цели и задачи.** Целью работы является разработка модели, алгоритмов и средств управления процессом лазерной подгонки плёночных РЭ, обеспечивающих повышение стабильности подогнанных резисторов, снижение трудоёмкости их изготовления и увеличение процента выхода годных изделий.

Основными задачами, решаемыми в рамках данной работы, являются:

- 1 разработка схемной модели токопроводящей среды плёночных РЭ при лазерной подгонке на основе дискретной аппроксимации резистивных плёнок сеткой элементарных резисторов (ЭР);

- 2 разработка и применение алгоритмов расчёта электрофизических параметров РЭ (сопротивления, плотности тока и мощности) для имитационного моделирования процесса подгонки и получения подгоночных характеристик (ПХ) РЭ на основе схемной модели;
- 3 разработка и исследование методов и алгоритмов получения и обработки исходной и текущей информации о технологических параметрах процесса подгонки РЭ в реальном времени (видеоинформация, данные о значении сопротивления, данные КД);
- 4 построение системы управления процессом лазерной подгонки РЭ и анализ адекватности разработанной схемной модели путём сравнения ПХ, полученных в результате имитационного моделирования, и реальных ПХ РЭ;
- 5 анализ результатов применения разработанных алгоритмов в системе управления процессом лазерной подгонки РЭ.

### **Научная новизна.**

1. Предложена сеточная схемная модель токопроводящей среды РЭ при лазерной подгонке сопротивления на основе метода конечных элементов, отражающая распределение тока в проводящей среде и электрофизические параметры резистора.
2. Предложен метод формирования структуры и формализации обобщённой схемной модели с приведёнными нормированными параметрами матрицы узловых проводимостей на основе теории графов.
3. Разработан алгоритм расчёта электрофизических параметров РЭ при изменении конфигурации токопроводящей среды в процессе подгонки на основе удаления ЭР в схемной модели на траектории реза.
4. Разработаны алгоритмы имитационного моделирования процесса подгонки и поиска необходимых параметров лазерного реза, обеспечивающего оптимальные характеристики РЭ по одному или нескольким критериям.
5. Разработаны алгоритмы детектирования РЭ по оптическому каналу лазерной установки в режиме реального времени.

**Теоретическая и практическая значимость.** Выполненные в диссертационной работе исследования представляют собой теоретические основы для решения задач моделирования и исследования процессов лазерной подгонки плёночных РЭ, выбора оптимальной траектории подгоночного реза и обеспечения необходимых технологических параметров изделий и процесса в целом.

Разработанные алгоритмы позволяют создавать новые системы лазерной подгонки, обеспечивающие современный уровень технологий изготовления плёночных резисторов как с точки зрения качества изделий, так и с точки зрения конструкции и функционирования самих лазерных машин. Применение разработанной системы имитационного моделирования на этапе проектирования топологии плат позволит более корректно формулировать требования к подгоночным резам и геометрии резисторов в целом.

Результаты работы были использованы при выполнении НИОКР по гранту ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» «Разработка и программная реализация алгоритмов автоматической фокусировки, определения ориентации и детектирования объектов топологии плат микросборок по оптическому каналу лазерной установки» № ГР 115052910007 и гранту РФФИ 14-07-00527 «Методы комбинирования детекторов в анализе сигналов и изображений».

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы для постановки и решения задач исследования использовались методы системного анализа и теории автоматического управления. В качестве основы для построения схемной модели применялись теория графов и метод конечных элементов. Получение и анализ подгоночных характеристик как результата работы синтезированных алгоритмов проводились с использованием методов имитационного моделирования и современных подходов к решению разреженных систем линейных алгебраических уравнений. Для детектирования РЭ по видеоизображению применялись современные методы анализа изображений и компьютерного зрения, методы получения и обработки первичной информации.

Также в ходе выполнения исследования были использованы данные, полученные при проведении экспериментов с использованием комплекса программного обеспечения, реализующего разработанные алгоритмы, на промышленной лазерной машине для подгонки плёночных резисторов в соответствии с ГОСТ 34.603-92 «Виды испытаний автоматизированных систем». При анализе результатов работы лазерной машины использовались прецизионные цифровые мультиметры; визуальный контроль выполнялся при помощи оптических микроскопов. Всё использовавшееся метрологическое оборудование входит в Государственный реестр средств измерений.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1 разработанная сеточная схемная модель токопроводящей среды РЭ при лазерной подгонке;
- 2 метод формирования структуры и формализация обобщённой схемной модели;
- 3 алгоритм расчёта электрофизических параметров резистора при изменении конфигурации токопроводящей среды в процессе подгонки РЭ;
- 4 алгоритмы имитационного моделирования процесса подгонки и поиска оптимальных параметров траектории лазерного реза;
- 5 алгоритмы детектирования РЭ по оптическому каналу лазерной установки в режиме реального времени.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Теоретические результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждаются проведёнными исследованиями модели на предмет адекватности и сравнения полученных ПХ РЭ с ПХ реальных изделий при помощи современного метрологического оборудования.

На основе представленных модели и алгоритмов разработано и запатентовано устройство для лазерной подгонки резисторов. Разработана и зарегистрирована программа автоматического детектирования объектов топологии плат микросборок по оптическому каналу лазерной установки.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXII, XXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (г. Иваново, 2009 г., г. Пенза, 2011 г.), VII Региональная молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодёжные инновации» (г. Тула, 2013 г.), 16-я Всероссийская конференция «Математические методы распознавания образов» (г. Казань, 2013 г.), Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления – 2015» (г. Москва, 2015 г.), 8-ая Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.).

Результаты исследовательской работы в виде библиотек программных модулей были внедрены в состав серийных машин лазерной подгонки резисторов серии МЛ5, машин лазерной маркировки и гравировки серии МЛП2, лазерных машин микрообработки серии МЛП1 производства ООО НПЦ «Лазеры и Аппаратура ТМ» г. Зеленоград, Москва, что подтверждается соответствующими Актами о внедрении.

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором. В публикациях, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат основные результаты. В разделе 4 ряд идей относительно выбора методов анализа и реализации алгоритмов принадлежит соавторам соответствующих публикаций.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, и 7 тезисов докладов в сборниках трудов международных, всероссийских и региональных конференций. Получен 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Выполнен отчёт о НИОКР.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов с выводами, заключения, списка литературы из 152 наименований. Общий объём диссертации составляет 204 страницы машинописного текста, содержит 99 рисунков, 19 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность задачи построения системы управления процессами лазерной подгонки плёночных РЭ, оценена степень разработанности темы, кратко сформулированы цель и задачи исследовательской работы, отмечены её научная новизна и практическая значимость, а также приведена структура диссертации.

**Первый** раздел содержит анализ современного состояния автоматизации и моделирования процессов лазерной подгонки плёночных РЭ. Рассмотрены предпосылки возникновения решаемых в диссертационной работе задач. На основе анализа литературы по теме исследования описаны и проанализированы различные способы решения задач повышения качества и производительности технологических процессов лазерной подгонки.

Приведены примеры лазерного технологического оборудования для подгонки резисторов. Предложен подход к совершенствованию установок и технологических процессов лазерной подгонки на основе внедрения механизмов системного анализа и принятия решений. Рассмотрены существующие подходы к моделированию плёночных РЭ при лазерной подгонке.

Обоснована применимость основных допущений при исследовании процессов лазерной подгонки: прямоугольная форма РЭ, однородность и изотропность резистивной плёнки, применение стандартных типов реза, анализ только резистивных свойств токопроводящей среды.

На основе вышеизложенного поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования.

**Во втором разделе** рассматривается построение схемной модели токопроводящей среды плёночного резистора и её математическое описание при действии

измерительного источника тока.

Для построения сеточной схемной модели плёночного резистора прямоугольной формы с размерами  $L \times H$  ( $L$  и  $H$  – длина и ширина резистивной плёнки соответственно), представленного на рисунке 1, предлагается аппроксимировать токопроводящую среду тела РЭ дискретной сеткой из ЭР сопротивлением  $r$ , которые являются одинаковыми и постоянными для однородных изотропных сред. Выбор шага сетки  $d$ , при котором учитываются диаметр лазерного луча и дискретность его перемещения, определяет число внутренних узлов схемы  $n$  и число ветвей – ЭР –  $b$  следующим образом:

$$n_L = L/d, \quad n_H = H/d, \quad n = n_L \cdot n_H, \\ b = (n_L + 1) \cdot n_H + (n_H - 1) \cdot n_L = 2 \cdot n_L \cdot n_H + (n_H - n_L).$$

Напряжения в узлах резистивной сетки являются дискретной аппроксимацией поля потенциала в резистивном слое.

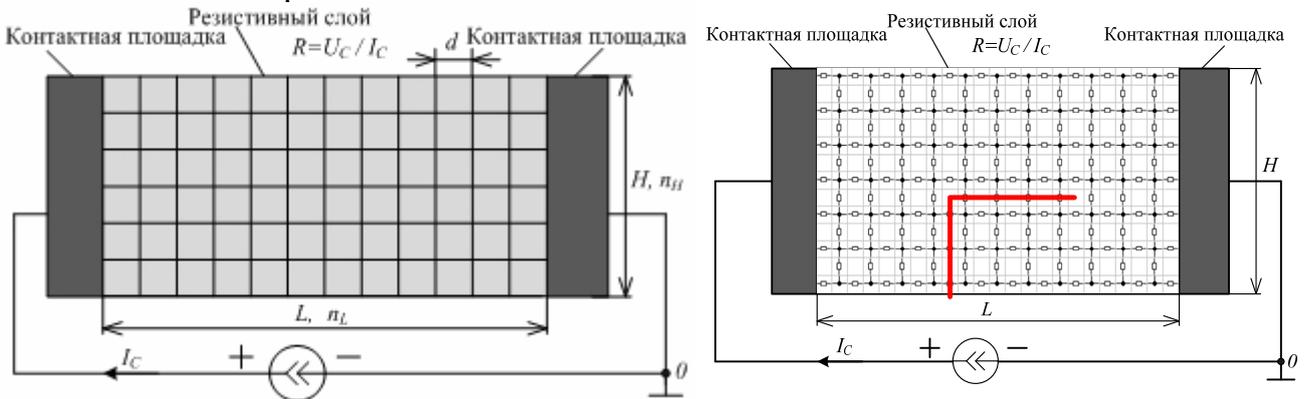


Рисунок 1 – Резистивный элемент с дискретной сеткой узлов. Метод формализации обобщённой схемной модели (слева) и сеточная схемная модель (справа)

Для формирования математической модели схемы и получения решения относительно узловых напряжений, напряжений и токов ветвей в зависимости от внешнего измерительного тока получена система линейных алгебраических уравнений относительно вектора узловых напряжений сетки  $\mathbf{u}_N$ :

$$\mathbf{A} \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{u}_N = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_B, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица инцидентий размерностью  $(n + 1) \times (b + 1)$  с линейно независимыми строками;

$\mathbf{Y}_B$  – матрица проводимостей ветвей размерностью  $(b + 1) \times (b + 1)$ ;

$\mathbf{u}_N$  – вектор узловых напряжений, размерность  $(n + 1) \times 1$ ;

$\mathbf{j}_B$  – вектор внешних источников тока ветвей, его размерность  $(b + 1) \times 1$ .

Матрица системы  $\mathbf{A} \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T = \mathbf{Y}_N$  – матрица полных проводимостей узлов – является квадратной невырожденной матрицей размерностью  $(n + 1) \times (n + 1)$ ; дополнительный  $(n + 1)$ -й столбец и  $(n + 1)$ -я строка относятся к внешнему  $(n + 1)$ -му узлу подключения измерительного источника тока.

Правую часть системы (1) определяет вектор эквивалентных узловых источников тока размерностью  $(n + 1) \times 1$ :

$$\mathbf{j}_N = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_B. \quad (2)$$

Сформированная система уравнений узловых уравнений

$$\mathbf{Y}_N \cdot \mathbf{u}_N = \mathbf{j}_N \quad (3)$$

имеет единственное решение относительно вектора узловых напряжений сетки  $\mathbf{u}_N$ :

$$\mathbf{u}_N = \mathbf{Y}_N^{-1} \cdot \mathbf{j}_N. \quad (4)$$

Компоненты вектора узловых напряжений  $\mathbf{u}_N$  в результате *узлового анализа* – решения системы (4) – однозначно определяются величиной внешнего измерительного тока  $I_C$ , поскольку вектор правой части (3) – *вектор эквивалентных узловых источников тока* (2) – с учётом структуры матрицы инциденций  $\mathbf{A}$  имеет только один последний ненулевой элемент, равный  $I_C$ :

$$\mathbf{j}_N = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_B = [0, \dots, 0, I_C]^T.$$

Далее система (1) относительно узловых потенциалов упрощается при умножении на сопротивление  $r$  за счёт сокращения проводимости в левой части и принимает вид:

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{A}_0^T \cdot \mathbf{u}_N = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_B \cdot r, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_N = \mathbf{A}_0 \mathbf{A}_0^T, \quad \mathbf{j}_N = \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}_B \cdot r = [0, \dots, 0, I_C \cdot r]^T,$$

где матрица  $\mathbf{A}_0$  является матрицей инциденций размерностью  $(n+1) \times b$ , полученной из матрицы  $\mathbf{A}$  путём обнуления  $(b+1)$  столбца. Это происходит за счёт нулевой проводимости источника тока в матрице проводимостей ЭР.

Полученную систему (5) будем называть *приведённой системой узловых уравнений*, а матрицу  $\mathbf{Y}_N = \mathbf{A}_0 \mathbf{A}_0^T$  – *приведённой матрицей узловых проводимостей*. Элементы этой матрицы не зависят от сопротивлений резисторов сетки, они являются целыми числами, отражающими структуру (топологию) схемной модели, и определяются количеством элементов сетки, подключенных к тому или иному узлу.

Решение приведённой системы (5) линейно зависит от сопротивлений ЭР сетки при их одинаковой величине. Таким образом, система (5) принимает вид:

$$\mathbf{Y}_N \cdot \mathbf{u}_N = [0, \dots, 0, I_C \cdot r]^T. \quad (6)$$

После решения системы (6) относительно вектора узловых напряжений сетки  $\mathbf{u}_N$

$$\mathbf{u}_N = \mathbf{Y}_N^{-1} \cdot \mathbf{j}_N = [\mathbf{A}_0 \mathbf{A}_0^T]^{-1} \cdot \mathbf{j}_N$$

выделяется элемент  $u_{n+1}$ , который равен падению напряжения на плёночном резисторе между контактными площадками  $u_{n+1} = U_C$ , и при известном измерительном токе  $I_C$  рассчитывается результирующее сопротивление РЭ

$$R = U_C / I_C.$$

Далее рассчитываются напряжения на ЭР сетки на основе преобразования узлов

$$\mathbf{u}_B = \mathbf{A}_0^T \cdot \mathbf{u}_N,$$

токи резисторов

$$\mathbf{i}_B = \mathbf{Y}_B \cdot \mathbf{u}_B$$

и мощности на резисторах сетки как произведение элементов вектора напряжений ветвей  $\mathbf{u}_B$  и соответствующих элементов вектора токов ветвей  $\mathbf{i}_B$ :

$$P_{R_k} = u_{R_k} \cdot i_{R_k}, \quad k = 1, \dots, b.$$

В процессе лазерной подгонки сопротивления резистора часть токопроводящей плёнки удаляется, так как под действием лазерного луча происходит испарение резистивного слоя. При этом результирующее сопротивление РЭ увеличивается. При моделировании процесса подгонки в схемной модели происходит удале-



на ЭР модели, а также строить подгоночные характеристики исследуемых резисторов и диаграммы распределения мощностей и токов по ветвям. Исходными данными являются геометрические размеры РЭ, диаметр пятна лазерного излучения, начальное («претестовое») значение сопротивления резистора и величина измерительного тока либо напряжения, а также значение размера узла, определяющего шаг дискретизации модели.

На рисунке 3 приведён пример работы программы, где представлено поле направлений токов по резистивному элементу, полученное при моделировании процесса подгонки.

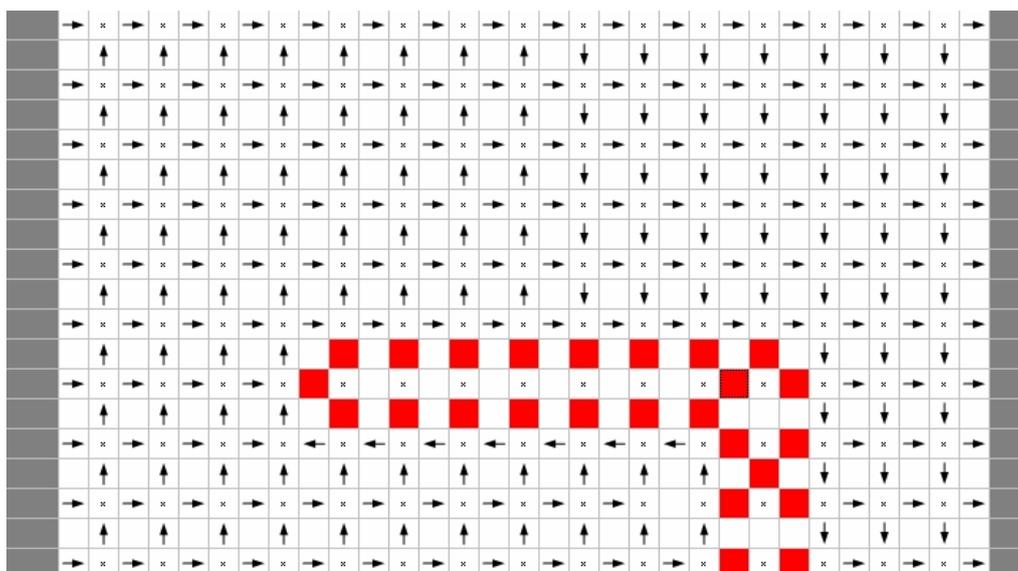


Рисунок 3 – Поле направлений токов по резистивному элементу

Одной из важнейших функций программы «ResModel» является поиск оптимальных параметров траектории подгонки типа «U-рез». На рисунке 4 представлен вид рассчитанного оптимального подгоночного реза на теле резистора в программе «ResModel» и полученная при моделировании процесса выполнения данного реза подгоночная характеристика.

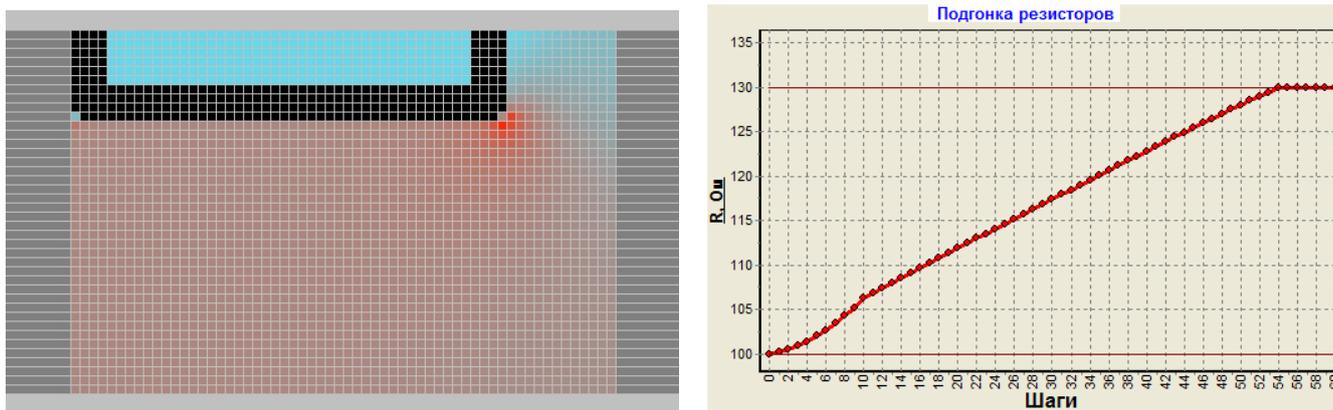


Рисунок 4 – Подгоночный рез (слева) и соответствующая ему ПХ (справа)

Основными критериями оптимальности являются достижение требуемой точности сопротивления РЭ и обеспечение минимальных значений максимальной рассеиваемой мощности на ЭР, в особенности – на прилегающих к подгоночному резу ветвях.

**В четвёртом разделе** описан синтез новых и модификация существующих методов и алгоритмов получения и обработки информации о ходе технологического процесса подгонки РЭ, необходимой для применения разработанных алгоритмов имитационного моделирования в реальных системах.

В качестве исходной информации рассматриваются сведения, содержащиеся в КД, данные о значении сопротивления и получаемая посредством оптического канала лазерной установки видеоинформация.

На основе данных КД разработанные алгоритмы формируют представление топологии изделия и технологических параметров элементов платы: исходные координаты РЭ и инцидентных им контактных площадок, допустимые траектории движения измерительных зондов и зоны расположения подгоночных резов на теле плёночного резистора.

Данные о текущем значении сопротивления РЭ, получаемые посредством измерительной системы, могут являться как исходной информацией («претест»), так и текущей, получаемой в режиме реального времени, поскольку они требуются для принятия решения уже в ходе выполнения операции лазерной подгонки и должны быть оперативно проанализированы на корректность с точки зрения наличия и величины шумов.

Для корректного позиционирования платы используются стандартные методы пассивного контрастного автофокуса и ориентации по углу поворота. Это необходимо для выполнения лазерного реза параллельно сторонам РЭ и сохранения постоянным значения диаметра пятна лазерного излучения.

Для определения геометрических размеров РЭ производится детектирование его границ по видеоизображению и выделение локальных особенностей на основе поля градиентов изображения, подвергнутого специальной фильтрации для удаления шумов. Для определения вектора градиента используется рекурсивный экспоненциальный фильтр. Алгоритм уточнения прямоугольника резистивного элемента основан на дискретном преобразовании Радона. Поскольку элементы топологии имеют в основном вертикальные и горизонтальные границы, вместо полного преобразования Радона достаточно вычислить значения построчных и постолбцовых сумм, что наглядно продемонстрировано на рисунке 4.

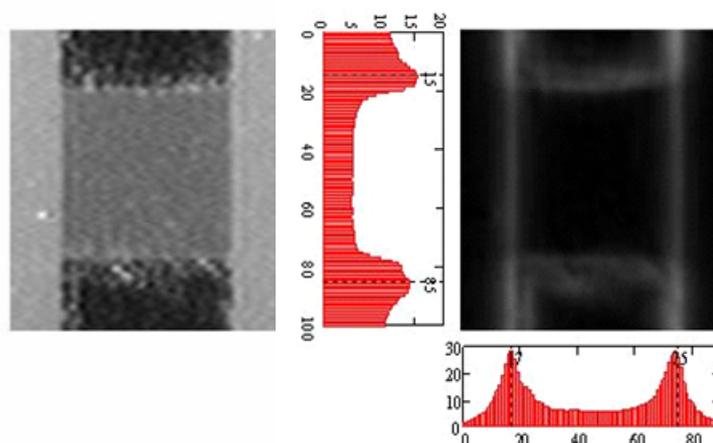


Рисунок 4 – Пояснение принципов работы алгоритма определения границ элемента топологии. Исходное изображение (слева), сглаженный модуль градиента и значения построчных и постолбцовых сумм справа

**Пятый раздел** содержит результаты исследования разработанной сеточной схемной модели и алгоритмов получения и обработки информации в системе управления машиной лазерной подгонки.

Описан программно-технологический комплекс, представляющий собой лазерную машину для подгонки плёночных резисторов, в программное обеспечение которого внедрены разработанные модули имитационного моделирования и видеоанализа, и алгоритм его функционирования.

Алгоритмы получения и анализа информации о топологии плат из электронных файлов КД позволяют формировать большую часть рабочей таблицы «проекта» автоматически, без необходимости ручной коррекции расположения измерительных зондов или лазерного луча.

В результате исследования алгоритмов автоматической оптической фокусировки были получены графики функции автофокуса с использованием различных вариантов системы освещения рабочей зоны, в том числе и для ситуации с двойной (зависимой и независимой по отношению к оптическому объективу) подсветкой. Данные исследования алгоритма определения ориентации подложки по углу поворота на примере плат тонкоплёночных ГИС и плат с толстоплёночными чип-резисторами показали достаточность применяемого метода с точки зрения точности позиционирования.

Внедрение разработанных алгоритмов детектирования объектов топологии плат по видеоизображению позволило не только автоматически получать точные геометрические размеры РЭ для их использования в качестве исходных данных при моделировании процесса подгонки, но и значительно снизить число ситуаций, приводящих к некорректному выполнению лазерного реза, тем самым повысив процент выхода годных изделий.

Для проверки адекватности разработанных сеточных моделей и корректности алгоритмов проведён ряд экспериментов. Вначале выполнялся «претест» РЭ и с помощью разработанных алгоритмов детектирования границ определялись его геометрические размеры. На основе этих исходных данных выполнялось имитационное моделирование подгонки резистора с заранее заданными параметрами. Далее выполнялась подгонка реального РЭ на лазерной машине с такими же параметрами траектории реза. Математическое ожидание  $M[X]$ , дисперсия  $D[X]$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  приведённой разности реальных значений сопротивления РЭ и полученных при моделировании (т.е.  $X = \left| \frac{R_{реал} - R_{модель}}{R_{реал}} \right| \cdot 100\%$ ) приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты проверки адекватности разработанных моделей

Тип чип-резистора	Номинал, Ом	$M[X]$	$D[X]$	$\sigma$
Тонкоплёночный	1 000 ... 1 300	0,2131	0,0167	0,1293
Толстоплёночный	730 ... 815	0,7235	0,0335	0,1832

На основе полученных данных сделан вывод о допустимости применения разработанной модели и алгоритмов для поиска оптимальных параметров траектории подгоночного реза.

В ходе проведения серии экспериментов были построены ПХ и получена оценка относительных максимальных значений рассеиваемой мощности на рези-

сторях, подогнанных стандартными типами реза в ходе исследования адекватности моделей. Затем в программе имитационного моделирования на основе алгоритма поиска оптимальных параметров траектории подгонки были определены координаты точки начала подгоночного реза и длины его плеч. После этого выполнена лазерная подгонка серии тонкоплёночных чип-резисторов спроектированным резом. Один из таких РЭ с ПХ соответствующего выполненного реза показан на рисунке 5.

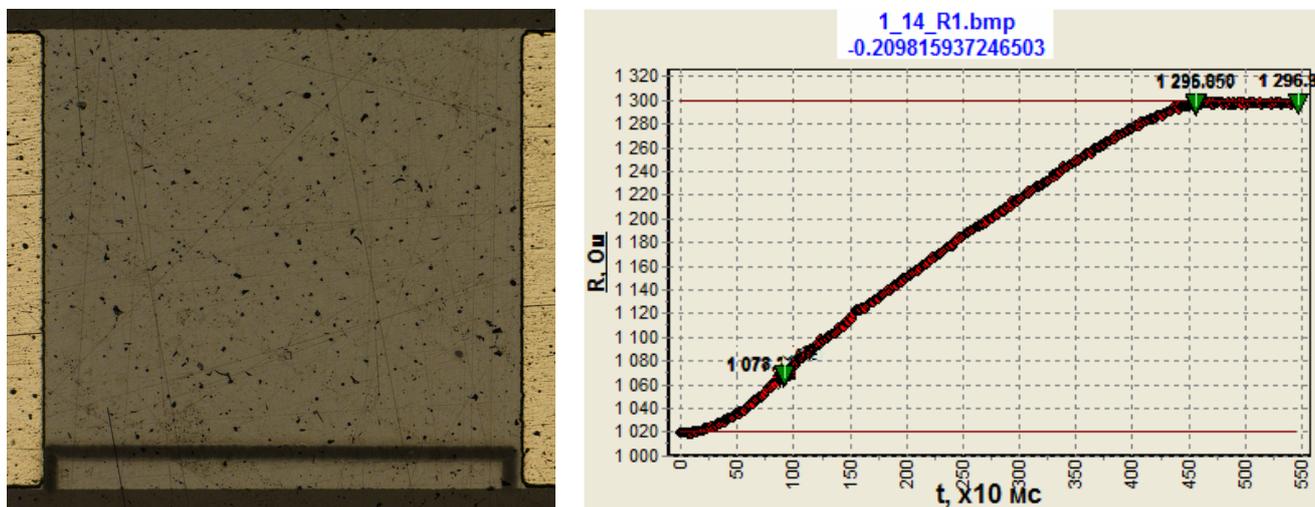


Рисунок 5 – РЭ со спроектированным оптимальным подгоночным резом и его ПХ

Исходя из подтверждённой адекватности разработанных моделей сделан вывод о соответствии значений максимально допустимой рассеиваемой мощности в смоделированном и реальном РЭ. Сравнительный анализ результатов подгонки показал, что выполнение оптимальных подгоночных резов позволяет уменьшить максимальные величины токов на прилегающих к резу элементарных резисторах на 40-80%. Таким образом, очевидно повышение эксплуатационных характеристик плёночных резисторов, лазерная подгонка которых выполнена с использованием заранее смоделированных траекторий, при допустимой разнице итогового отклонения от номинала.

**В заключении** диссертационной работы изложены основные выводы и результаты, полученные в ходе исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги исследования.** В ходе исследования разработаны, проанализированы, реализованы и внедрены в систему управления серийными лазерными машинами модель и алгоритмы получения и обработки информации, достигнуты следующие основные теоретические и практические результаты:

- 1 на основе дискретной аппроксимации резистивных плёнок сеткой элементарных резисторов предложена сеточная схемная модель токопроводящей среды РЭ при лазерной подгонке и описан метод формирования её структуры;
- 2 на базе разработанных алгоритмов расчёта электрофизических характеристик РЭ и поиска оптимальных параметров подгоночного реза построена система имитационного моделирования процессов подгонки;
- 3 разработаны алгоритмы автоматической оптической фокусировки, ориентации детали по углу поворота и детектирования РЭ по видеоканалу лазерной установки в режиме реального времени;

- 4 в результате внедрения разработанной модели и алгоритмов в программное обеспечение машины лазерной подгонки резисторов построена система управления, обладающая новыми с научно-технической точки зрения функциональными возможностями и обеспечивающая повышение технико-экономических показателей технологического процесса (увеличение процента выхода годных изделий, снижение трудоёмкости, получение более стабильных эксплуатационных характеристик плёночных резисторов);
- 5 экспериментально подтверждена адекватность разработанной модели и её достаточность для получения ПХ и электрофизических параметров моделируемых РЭ, с допустимой точностью соответствующих ПХ и параметрам реальных изделий.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Разработанная модель токопроводящей среды РЭ может применяться также и для отличных от рассматриваемых в данной работе конфигураций резисторов и подгоночных резисторов. Применимость алгоритмов автоматической оптической фокусировки, ориентации детали по углу поворота и детектирования объектов по видеоизображению не ограничивается машинами лазерной подгонки резисторов, поскольку аналогичные по сути задачи стоят перед разработчиками современных систем лазерной маркировки, сварки и резки, микрообработки, прошивки отверстий и т.д.

К перспективам дальнейшей разработки темы можно отнести следующие направления исследований: коррекция значения сопротивления элементарных резисторов в процессе моделирования и подгонки реальных РЭ; сбор, накопление и анализ статистики; предварительная и итоговая оптическая инспекция состояния резистивной плёнки на соответствие параметрам КД и наличие дефектов; повышение частоты измерений и их синхронизация с импульсами лазерного излучения.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Кондрашов, В. В. Задача автоматизации процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов / В. В. Кондрашов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1. Вып. 2. – С. 207-214.
2. Кондрашов, В. В. Автоматизация процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов / В. В. Кондрашов, А. В. Копылов, О. С. Середин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 2. – С. 146-159.
3. Кондрашов, В. В. Схемные модели токопроводящей среды плёночного резистивного элемента при лазерной подгонке сопротивления / В. В. Кондрашов, А. В. Лукашенко // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2015. – № 4. – С. 121-128.
4. Устройство для лазерной подгонки резисторов : пат. 122523 Рос. Федерация : МПК<sup>51</sup> Н 01 С 17/242, В 23 К 26/36 / Л. Г. Сапрыкин, М. Н. Миленький, В. В. Кондрашов ; заявитель и патентообладатель ООО Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». – № 2012126035\02 ; заявл. 25.06.2012 ; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. – 13 с.
5. Устройство для лазерной подгонки резисторов : пат. 2519689 Рос. Федерация : МПК<sup>51</sup> В 23 К 26/08, Н 01 С 17/242 / Л. Г. Сапрыкин, М. Н. Миленький, В. В. Кондрашов ; заявитель и патентообладатель ООО Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». – № 2012126034\02 ; заявл. 25.06.2012 ; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. – 13 с.

6. Ларин А.О., Середин О.С., Копылов А.В., Кондрашов В.В. Программа автоматического детектирования объектов топологии плат микросборок по оптическому каналу лазерной установки, Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015662420, 24.11.2015.
7. Кондрашов, В. В. Компьютерная поддержка производства плат микросборки на примере подгонки тонкоплёночных резисторов / В. В. Кондрашов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб.трудов XXII Междунар. науч. конф.: в 11 т. – Иваново, 2009. – Т. 11: Летняя Школа молодых учёных. – С. 80-81.
8. Кондрашов, В. В. Задача автоматизации процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов / В. В. Кондрашов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: сб.трудов XXIV Междунар. науч. конф.: в 10 т. – Пенза, 2011. – Т. 9. Секции 9, 13. – С. 136-138.
9. Кондрашов, В. В. Автоматизация процессов лазерной подгонки резистивных элементов / О. А. Кушнир, В. В. Кондрашов // VII региональная молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодёжные инновации»: сборник докладов. – Тула, 2013. – Ч. II. – С. 178-179.
10. Кондрашов, В. В. Комбинирование одноклассовых классификаторов в задачах сегментации изображений, содержащих объекты топологии печатной платы / А. О. Ларин, О. С. Середин, В. В. Кондрашов // Математические методы распознавания образов: 16-я Всероссийская конференция, г. Казань, 6 – 12 сентября 2013 г.: Тезисы докладов. – М., 2013. – С. 67.
11. Кондрашов, В. В. Комбинирование одноклассовых классификаторов в задачах сегментации изображений, содержащих объекты топологии плат микросборок / А. О. Ларин, О. С. Середин, В. В. Кондрашов // Машинное обучение и анализ данных. – 2014. – Т. 1, № 7. – С. 835-842.
12. Кондрашов, В. В. Детектирование объектов топологии плат микросборок по оптическому каналу лазерной установки / В. В. Кондрашов, О. С. Середин, А. В. Копылов, А. О. Ларин // Техническое зрение в системах управления – 2015, тезисы научно-технической конференции, Москва, ИКИ РАН, 17-19 марта 2015. 2015. С. 80-81.
13. Разработка и программная реализация алгоритмов автоматической фокусировки, определения ориентации и детектирования объектов топологии плат микросборок по оптическому каналу лазерной установки : отчет о НИОКР (заключ.): / ООО ЛКАД; рук. Середин О.С. – Тула, 2015. – 65 с. – Исполн.: Копылов А.В., Ларин А.О., Кондрашов В.В. – № ГР 115052910007. – Инв. № Б2015-03.
14. Кондрашов, В. В. Имитационное моделирование процесса автоматической лазерной подгонки плёночных резисторов / В. В. Кондрашов, О. С. Середин // Beam Technologies and Laser Application : Proceedings of the international scientific and technical conference. – СПб., 2016. – С. 35-42.

Подписано в печать 26.07.2016.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 170-07.

Тульский государственный университет 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ 300012, г. Тула, пр.Ленина, 97, а