

УДК 512.6

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Новиков Илья Владимирович<sup>1</sup>, Никонов Эдуард Германович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант;

Государственный университет «Дубна»;

Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: novilya77@gmail.com.

<sup>2</sup>Доктор физико-математических наук, профессор;

Государственный университет «Дубна»;

Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;

e-mail: nikonov@uni-dubna.ru.

В данной статье представлен разрабатываемый алгоритм повышения степени автоматизации для получения большей эффективности подгонки разрабатываемых пленочных резисторов. Данный алгоритм включает в себя сбор и анализ данных, прогнозирование и принятие решений. Использование данного алгоритма позволит снизить затраты на контроль технологического процесса подгонки, повысит качество лазерной подрезки. Приведены примеры существующих алгоритмов работы лазерной подгонки, существующие решения алгоритмов автоматизации и текущие проблемы в данной задаче.

**Ключевые слова:** лазерная подгонка, автоматизация технологических процессов, плёночные резистивные элементы, производство.

### Для цитирования:

Новиков И. В., Никонов Э. Г. Применение технологий автоматизации для повышения эффективности лазерной подгонки пленочных резисторов // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2023. № 4. С. 35-44. EDN: ZSEODJ. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/597>.

## APPLICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR ANALYSIS OF THE LABOR ACTIVITY OF ENTERPRISE EMPLOYEES

Novikov Ilya V.<sup>1</sup>, Nikonov Eduard G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD student;

Dubna State University;

19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;

e-mail: novilya77@gmail.com.

<sup>2</sup>Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, professor;

Dubna State University;

19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;

e-mail: nikonov@uni-dubna.ru

This article describes the algorithm being developed to increase automation in order to obtain greater efficiency of fitting the developed film resistors. This algorithm includes data collection and analysis, forecasting and decision-making. The use of this algorithm will reduce the cost of controlling the technological process of fitting, improve the quality of laser trimming. Examples of existing algorithms of laser fitting operation, existing solutions of automation algorithms and current problems in this problem are given.

**Keywords:** laser fitting, automation of technological processes, film resistive elements, production.



Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>

**For citation:**

Novikov I. V., Nikonov E. G. Application of intelligent systems for analysis of the labor activity of enterprise employees. *System analysis in science and education*, 2023;(4):35-44 (in Russ). EDN: ZSEODJ. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/597>.

**Введение**

В современной промышленности и технике все большую популярность получает автоматизация производственных процессов, включая подгонку пленочных резистивных элементов (РЭ). Лазерная подгонка является одним из наиболее эффективных способов достижения высокой точности и контроля параметров таких элементов, как точность доводки РЭ до требуемого номинала, снижения количества получаемого брака и сокращения трудозатрат операторов, что приводит к снижению себестоимости изготавливаемого изделия.

В то же время текущие системы автоматизации установок не позволяют существенно снизить или полностью исключить из работы оператора. Бывают ситуации, когда оператор должен выполнять рутинные работы и выполнять анализ исполняемого технологического процесса (ТП), выбирать требуемые параметры выполнения задания реза для каждого резистивного элемента (установка резистора, внесение координат, тип реза, сила и частота пучка). Так же возникают осложнения ввиду отступлений от технических требований или различия в технологии изготовления, или конструкторской документации (КД) [1].

Поэтому следующим этапом в повышении автоматизации процессов подгонки РЭ является создание установок лазерной подгонки с наличием механизма анализа, сбора информации и принятия решений, основывающийся на предварительном моделировании процесса подгонки и позволяющим минимизировать участие оператора либо полностью убрать оператора из работы и выполнить задачу в автоматическом режиме.

При создании алгоритмов процессов подгонки следует учитывать особенности каждого изготавливаемого изделия и его КД, а также информацию о таких изменяющихся данных как:

- расположение изделия в момент операции подгонки;
- нахождения резистивных элементов на изделии;
- текущее нахождение лазерного пятна лазерного излучения;
- текущее и предыдущее сопротивление РЭ.

Знание топологии проекта и анализ в режиме реального времени приведенных выше параметров позволят с большей точностью спрогнозировать ситуацию и более точно смоделировать процесс, либо оптимизировать его по заданным ТП критериям.

По разным причинам расположение и размеры резисторов могут отличаться от заданных в КД меток. Кроме того, может возникнуть и проблема с определением фактического положения или размера лазерного пятна на подложке. Поскольку размеры РЭ и лазерного пятна являются одними из важнейших исходных данных для построения модели резистора, то появляется потребность анализа расположения платы на основе видеоинформации. При этом следует учитывать специфику использования стандартных алгоритмов машинного зрения, так как нередко это бывает затруднено спецификой изображений платы с топологией рисунка на текущих установках с современными оптическими системами и особенностями их эксплуатации – нарушение экспозиции, расфокусировка.

Из этого можно сделать вывод, что задача построения системы лазерной подгонки на основе синтеза и создания новых алгоритмов управления является актуальной научной задачей и требует комплексного подхода, опирающегося на современные методы получения информации, проведения анализа и принятия решений.

## 1. Обзор существующих работ

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 [2, 3]. 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 [4].

Методы расчёта сопротивления резисторов при их проектировании и подгонке рассматривались в работах В. П. Вейко [5, 6], J. Ramires-Angulo [7, 8], R.L. Geiger, E. SanchezSinencio, Phillip и Peter A. Sandborn [9, 10, 11], Rocky Hilburn, Craig Hasegawa, Jiangtao Wang [12].

Из отечественных работ, посвящённых моделированию плёночных резисторов, можно выделить работы Ю.Н. Антонова, М.Г. Рубановича, В.Н. Бугрова, В.Д. Садкова, В. В. Кондрашова. 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 [13, 14, 15, 16, 17, 18]. В свою очередь, М.Г. Рубанович рассматривает электромагнитное моделирование мощных плёночных РЭ в сверхвысококачественных схемах, учитывая распределение ёмкости и индуктивности в поперечном сечении резистора [19, 20, 21]. Труды В. Н. Бугрова посвящены синтезу конфигурации плёночных РЭ с требуемой функцией дискретной подстройки на основе математических моделей [22]. В работах В. Д. Садкова сделан акцент на построении моделей РЭ методом конформных отображений [23, 24]. В работах В. В. Кондрашова сделан акцент изучении управления процессом лазерной подгонки на основе сеточной схемной модели, разработке алгоритма расчетов электрофизических параметров и РЭ при изменении конфигурации токопроводящей среды в процессе подгонки и алгоритма имитационной модели подгонки и поиска требуемых параметров [25].

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.

## 2. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка модели и алгоритмов, средств управления процессов лазерной подгонки РЭ, которые позволят повысить стабильность подогнанных резисторов, снизить трудоемкость и трудозатраты на их изготовления и повышения выхода высококачественных изделий.

Основные задачи, решаемые в рамках данной работы:

- исследование эффективности существующих методов и средств автоматизации лазерных подгонщиков резистивных элементов и подобных устройств;
- разработка нового метода автоматизации для устройства лазерной подгонки резистивных элементов;
- разработка обучения автоматического детектирования и распознавания объектов топологии платы по её видеоизображению;
- разработка способа формирования рабочих файлов задания по КД с применением методов машинного обучения.

Внесение автоматизации в данные этапы лазерной подгонки позволят сократить время составления рабочих файлов задания и уменьшат работу операторов, так как на данный момент времени детектирование платы, распознавание расположения объектов платы и резисторов, которые требуется подвергнуть подгонке, а также составление пути реза, мощности лазера и остальные необходимые настройки для работы по задаче составляется вручную.

Научную новизну работы составляет следующее:

- Принципиально новое применение машинного обучения для автоматизации процесса лазерной подгонки резистивных элементов.
- Методика обучения автоматизации процессов распознавания и детектирования объектов топологии плат.
- Методика формирования КД рабочих файлов задания на основе данных о топологии плат и ее свойств.

### 3. Модульное описание системы лазерной подгонки

Система лазерной подгонки состоит из нескольких модулей, которые взаимодействуют друг с другом.

Каждый модуль выполняет свою функцию и взаимодействует с другими модулями для обеспечения эффективной работы системы в целом.

Система лазерной подгонки имеет иерархическую структуру. На верхнем уровне находится модуль сбора данных, который получает информацию от различных источников, таких как датчики, камеры, базы данных и т. д.

На следующем уровне находится модуль анализа данных, который обрабатывает полученные данные и выявляет зависимости и тенденции.

Затем следует модуль прогнозирования, который предсказывает возможные проблемы на основе анализа данных.

И наконец, на нижнем уровне находится модуль принятия решений, который на основе предложенных решений принимает окончательные решения о необходимых действиях (см. рис. 1).

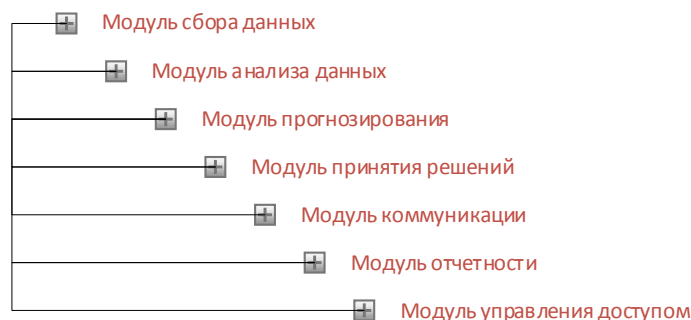


Рис. 1. Модули системы

Ниже представлен перечень модулей с описанием функционала и задач, решаемых каждым из них.

Модуль сбора данных: собирает данные с различных источников, таких как системы текущего расположения лазерного пучка, текущий номинал РЭ и его расположение и т. д.

Модуль анализа данных: обрабатывает и анализирует собранные данные, чтобы определить следующие этапы выполнения, следует ли сдвигать лазерный пучок, изменить ли мощность пучка, соответствует ли текущий номинал РЭ требованиям ТП и т.д.

Модуль прогнозирования: на основе анализа данных модуль прогнозирования предсказывает возможные передвижения пучка, изменения его мощности, направления и тип реза на РЭ для получения необходимой мощности и точки остановки.

Модуль принятия решений: использует результаты анализа и прогнозирования для принятия решений о действиях, которые необходимо предпринять для получения годного изделия.

Модуль коммуникации: обеспечивает обратную связь с оператором в случае неожиданных ошибок и принятия решений в случае, когда система не может самостоятельно выполнить задачу

(проблемы с определением расположения, отсутствии изделия и других незапланированных ошибках).

Модуль отчетности: формирует отчеты о производимых операциях лазерного подгонщика, оптимальные пути реза на определенных РЭ для будущих реализаций работ с подобными изделиями, количестве годных материалов и условий, приводящих к созданию брака продукции.

Модуль управления доступом: обеспечивает контроль доступа к данным и функциям системы для оператора для возможности ручного управления и внесения корректировок в работу.

#### ***4. Алгоритм процесса работы подгонки***

В данной части будет приведен общий алгоритм работы лазерного подгонщика, а также внутренние алгоритмы работы некоторых из этапов.

Общий алгоритм работы лазерного подгонщика с участием оператора на начальных этапах выглядит следующим образом (см. рис. 2):

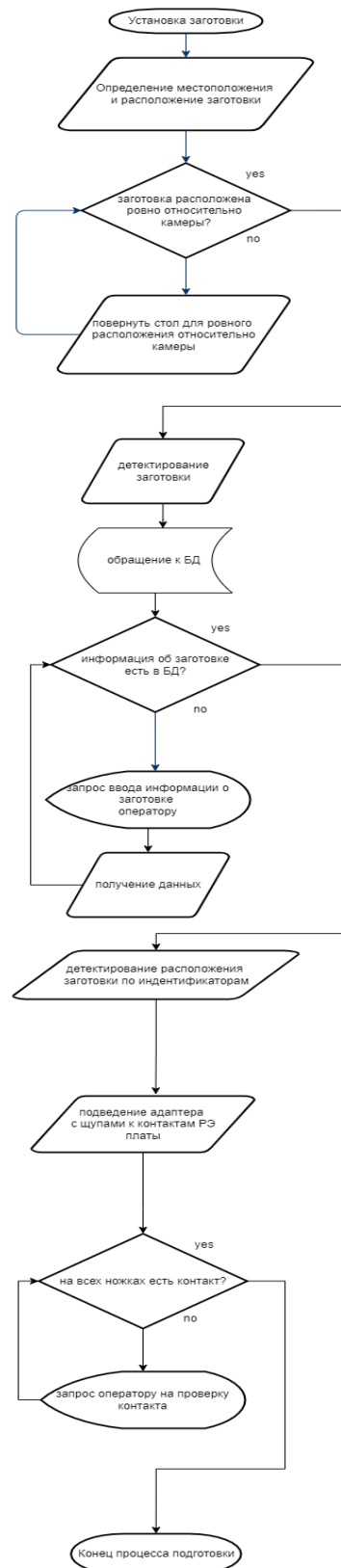


Рис. 2. Общая схема алгоритма работы лазерной подгонки

Первым этапом является установка оператором заготовки в рабочей зоне лазерной резки с выводом рабочей зоны в исходное положение перед началом обработки заготовки. Операция проводится вручную для совмещения начала координат системы наблюдения и заготовки.

Следующим этапом является определение местоположения и расположение заготовки на рабочей области при помощи камеры над рабочей областью.

После нахождения объекта производится детектирование и определение расположения самой заготовки относительно основных осей (перевернута ли данная заготовка, стоит ли криво и т.д.), чтобы передать данную информацию следующему блоку для определения дальнейших операций.

В момент детектирования платы происходит обращение в подготовленную базу знаний топологий плат, чтобы определить наличие или отсутствие данной платы в ней. Если данная топология уже есть в базе, то информация по ее характеристикам и методам реза передается в текущую программу реза с наложением топологии для определения расположения заготовки, описанного выше. Если же в базе данных нет данной топологии – происходит обращение к оператору с требованием внесения требуемых данных для работы с заготовкой.

После определения вышеперечисленных операций происходит этап подведения измерительных щупов в области измерения резисторов для проверки наличия контактов с требуемыми местами заготовок в текущей программе реза. Если же при проверке выясняется, что контакта не происходит на одном из участков подложки, то происходит уведомления оператора внести корректировочные данные для посадки измерительных щупов для дальнейшей работы и внесения изменений принципа работы в базу знаний с текущими условиями и положения данной подложки.

Далее происходит сам процесс подгонки РЭ (см. рис. 3). Он заключается в режиме первоначальной проверки резистора. Если он не соответствует требованиям ТЗ, то лазерный подгонщик производит подгонку данного РЭ с постоянным измерением резистора. Данное измерение необходимо для определения точки останова при достижении требуемого сопротивления досрочно, до окончания программы реза. Если резистор не достигает требуемого номинала в соответствии с внесенными данными, производится дальнейшая подрезка с коррекцией пути реза или производится выбраковка резистора по причине невозможности дальнейшей подгонки (в случае подгонки заготовки с больших количеством РЭ дальнейшая подрезка может повредить плату или же сам резистор, что приведет в полной выбраковке заготовки).

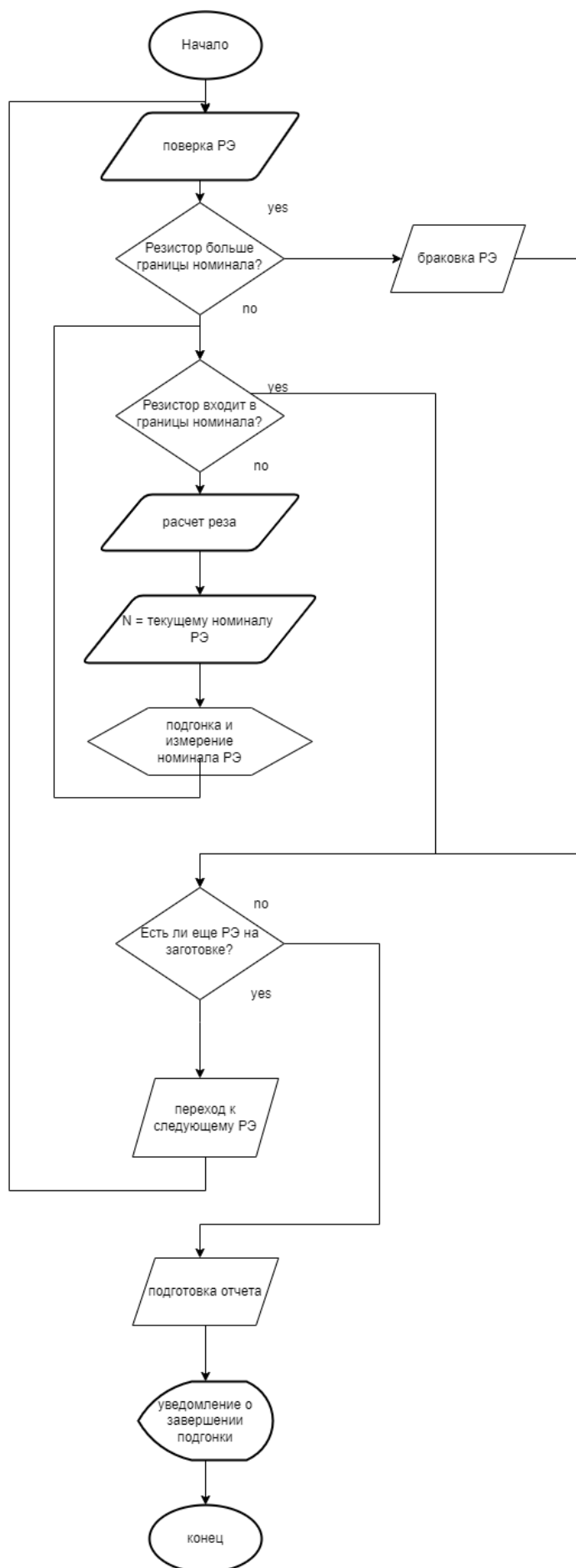


Рис. 3. Схема алгоритма этапа подгонки



## Заключение

Установки лазерной подгонки являются важным элементом в производстве элементной базы современной электроники и микроэлектроники. Разработка нового модуля с использованием новых алгоритмов для достижения более высокого уровня автоматизации данной системы позволит повысить эффективность и качество данных систем, а также и снижение временных и трудовых затрат в производстве электротехники и микроэлектроники. Уже существующие на данный момент исследования позволяют сделать следующие выводы. Разработка представленного в настоящей работе алгоритма возможно, но для его доводки до этапа промышленной эксплуатации необходимо решить еще ряд задач, которые требуют дальнейших исследований и испытаний в рамках опытной эксплуатации.

## Список источников

1. Кондрашов В. В. Задача автоматизации процесса лазерной подгонки плёночных резистивных элементов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1. Вып. 2. – С. 207-214.
2. Schimmanz K. Film resistor design for high precision laser trimming / K. Schimmanz, S. M. Jacobsen // Preprint BTU-Cottbus M-02/02, Germany. – 2002.
3. Kost A. Numerische Methoden in der Berechnung elektromagnetischer Felder // Springer Verlag, Berlin. – 1994.
4. Schimmanz K. BEM simulation of laser trimmed hybrid IC resistors / K. Schimmanz, A. Kost // Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics. – vol. 19, no. 1-4. – 2004. – P. 253-256.
5. Вейко В. П. Лазерные технологии в микроэлектронике / В. П. Вейко, С. М. Метев. – Изд. Болгарской АН, София, 1991.
6. Вейко В. П. Расчёт толщины прогреваемого слоя в подложке при лазерном нагревании тонких плёнок / В. П. Вейко, Е. А. Тучкова, Б. М. Юркевич // Физика и химия обработки материалов, 1982. – № 3. – С. 21-24.
7. Ramirez-Angulo J. Improvement of Laser Trimmed Film Resistor Stability by Selection of Optimal Trim Paths / J. Ramirez-Angulo; R. Wang; R. L. Geiger // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 1991. – Vol. 4/5 VLSI Design and CAD. – DOI: 10.1109/ISCAS.1991.176727.
8. Ramirez-Angulo J. New laser-trimmed film resistor structures for very high stability requirements / J. Ramirez-Angulo, R.L. Geiger // IEEE Trans on Electron Devices. – 1988. – vol. 35, no. 4. – P. 516-518. DOI: 10.1109/16.2487.
9. Sandborn P. The Economics of Embedded Passives // Integrated Passive Component Technology, R. Ulrich and L. Schaper editors, IEEE Press. – 2003. P. 327 – 359. DOI: 10.1002/9780471722939.ch13.
10. Sandborn P. A Comparison of Routing Estimation Methods for Microelectronic Modules / P. Sandborn, P. Spletter // Microelectronics International. – 1999. – P. 36-41.
11. Sandborn P. A. M. Using embedded resistor emulation and trimming to demonstrate measurement methods and associated engineering model development / P.A.M. Sandborn, P.A. Sandborn // International Journal of Engineering Education. – 2007. – vol. 23, no. 4.
12. Wang J. Thin film embedded resistors / J. Wang, S. Clouser // Proc. IPC Expo. – 2001. – P. S08-1-1.
13. Антонов Ю. Н. Автоматизация проектирования подгоночных траекторий коррекции плёночных резисторов гибридных интегральных схем: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / Антонов Юрий Николаевич. – Ульяновск, 1999. – 118 с.
14. Антонов Ю. Н. Допусковый контроль резистивных элементов и идентификация плат гибридных интегральных схем с помощью нечеткой экспертной системы // Известия Самарского научного центра РАН. – 2006. – Том. 8. – № 4(18). – С. 1061–1066.

15. Антонов Ю. Н. Принципы построения модели анализа качества элементов топологии в процессе лазерной подгонки // Микроэлектроника в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции (Ульяновск, 11-12 марта 1992 г.). – Ульяновск: НПК УЦМ. – 1992. – С. 66-67.
16. Антонов Ю. Н. Программное обеспечение автоматизированной установки лазерной подгонки резисторов / Ю. Н. Антонов, К. И. Вершинин, В. М. Николаев // Приборы и системы управления. – 1991. – №. 8. – С. 17.
17. Антонов Ю. Н. Разработка концепции модели лазерной подгонки // Труды международной научно-технической конференции ПИТ-2015. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева. – 2015. – С. 211-214.
18. Антонов Ю. Н. Разработка проекта нормирования точности сопротивления резисторов гибридных интегральных схем методом лазерной подгонки // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т.51. – №12. – С. 1436-1440.
19. Использование метода конечных элементов для расчёта парциального распределения ёмкости микрополосковой линии / М. Г. Рубанович, Д. В. Вагин, В. А. Хрусталева [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 3 (33). – С. 75-84.
20. Матричный метод расчёта индуктивных параметров эквивалентной схемы плёночного резистора / М. Г. Рубанович, В. П. Разинкин, Ю. В. Востряков [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2008. – Т. 3. – С. 70-76.
21. Математическая модель электромагнитных процессов в планарных плёночных резисторах / М. Г. Рубанович, А. П. Горбачев, Ю. В. Востряков, В. П. Разинкин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2003. – Т. 3. – С. 61-70.
22. Бавыкин, Б. Моделирование и настройка многоминальных чип-резисторов меандрового типа / Б. Бавыкин, И. Воробьёв, В. Бугров // Компоненты и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 175. – С. 115-120.
23. Садков, В. Д. Сопротивление низкоомного плёночного резистора / В. Д. Садков, А. В. Лопаткин // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 9 (182). – С. 49-56.
24. Садков, В. Д. Определение распределения электрического сопротивления в токопроводящей плёнке методом томографии / В. Д. Садков, А. В. Лопаткин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3 (110). – С. 22-33.
25. Кондрашов В. В. Управление процессом лазерной подгонки плёночных резистивных элементов на основе сеточной схемной модели токопроводящей среды: дисс. ...канд. техн. наук: 05.13.01 / Владимир Владимирович Кондрашов. – Тула, 2016. – 207 с.