

Алгоритм процесса обработки пленочных структур факельным разрядом

Новомейский Д.Н.* , Куликов А.В. , Пиганов М.Н.*****

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева,

Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

**e-mail: dmitr.novomejscky@yandex.ru*

*** e-mail: avksam@mail.ru*

**** e-mail: kipres@ssau.ru*

Статья поступила 30.10.2019

Аннотация

В статье приведен алгоритм процесса подгонки пленочных структур в виде резисторов путем их обработки высокочастотным факельным разрядом. Пленочные структуры входят в состав микросборок с нерегулярной структурой, на базе которых реализовано устройство контроля и управления бортовым комплексом обороны. Алгоритм обеспечивает высокую точность расчетов для заданных конструктивных параметров и может быть использован для автоматизации процесса подгонки элементов микросборок и решения задачи управления данным операционным технологическим процессом. Разработана программа определения оптимальной величины зазора между электродом и подгоняемым элементом на языке LabVIEW. При разработке алгоритма и программы расчета была использована математическая модель процесса факельной подгонки пленочных элементов микросборок. Приведены результаты расчетов.

Ключевые слова: бортовой комплекс обороны, микросборка с нерегулярной структурой, пленочный элемент, подгонка, факельный разряд, вычислительный алгоритм, программа расчета.

Введение

Создание перспективной бортовой аппаратуры для летательных и космических аппаратов диктует необходимость постоянного обновления элементной базы, повышения плотности монтажа и надежности проектируемой РЭА. Конструкции узлов бортовой РЭА должны базироваться на новейших технологиях. Для современного производства бортовой аппаратуры требуется более современное автоматизированное технологическое оборудование [1].

В настоящее время весьма востребованы малогабаритные комплексы нового поколения для защиты летательных аппаратов различного назначения с функциями радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления (РЭП) [2-7], выполненные по модульной технологии VPX [8]. Частным случаем таких комплексов являются станции оптико-электронного подавления [9]. Они используются также для затруднения решения задач радионавигации и технической разведки объектами противника [10].

Эффективность использования комплексов РЭП в вопросах вооруженного противостояния, как основы противоборства с системами боевого управления противника, рассматривается в [11]. Радиоэлектронное подавление обеспечивается созданием активных и пассивных помех, применением ложных целей, ловушек и другими способами.

Постановка задачи

Для оценки эффективности процесса создания бортовых РЛС необходимо провести анализ комплексного показателя риска. Он рассчитывается по информации о реальной трудоемкости. При оценке рисков создания унифицированных РЛС требуется непрерывный мониторинг степени готовности модулей и конструкторско-технологических систем, входящих в их состав [12].

Так, при разработке нового варианта бортового комплекса обороны (БКО) самолета, в состав которого входит радиолокационная станция активных помех, был превышен лимит массогабаритных показателей. В связи с этим было принято решение реализовать устройство контроля и управления БКО на другой конструктивной основе – в виде микросборок с нерегулярной структурой. Такие микросборки содержат тонко- и толстопленочные платы с высокоточными резистивными элементами. На стадии эскизного проектирования во время испытаний действующих образцов было выявлено, что операция лазерной подгонки не обеспечивает требуемой надежности пленочных элементов. Были проведены исследования других методов подгонки. В результате экспериментальных исследований был выбран метод подгонки путем обработки резисторов высокочастотным факельным разрядом [13-16]. Дальнейшие исследовательские испытания подтвердили высокую надежность пленочных резисторов после подгонки. Было проведено моделирование данной технологической операции [17-19].

Следующим этапом технологической подготовки производства стала автоматизация процесса подгонки и решение задачи управления данным операционным технологическим процессом.

Для оптимального решения задачи внедрения разработанной инновационной технологии с учетом производственно-технологических и экономических критериев и ограничений необходимо создание соответствующего математического и программно-алгоритмического обеспечения [20].

С этой целью была поставлена задача разработки алгоритма процесса подгонки. При этом должны быть учтены физические аспекты разряда [21, 22].

Модель подгонки

Модель подгонки представим в виде зависимости зазора l от параметров разряда. Для этого разрешим уравнение (18) [17] от величины l .

Выражение для определения величины зазора имеет следующий вид:

$$l = -\frac{\sqrt{5}\omega_{Ll}R_2}{2\sqrt{\omega\nu}} \ln \frac{G_1 S + G_2 + 8\pi \cdot 10^{-3} \frac{bt_p C_\phi^3}{\omega a^3 (G_1 S + G_2) e^{\left(-\frac{a}{2} T u G_3 + \frac{3}{2} k_{cp} T_{cp}\right)}}}{P_\phi} - h, \quad (1)$$

где

$$G_1 = \left[L_u + A_4 \left(1 + \frac{\pi \rho_{nn}}{2 \rho_R S} \right) + (L_n + A_3) \left(1 + \frac{\pi \rho_{nn}}{\rho_R S} \right) \right] \frac{h \rho_R}{t_p} + \frac{h \rho_R}{t_p} \left(\frac{L_n}{2} + A_3 \right) \sqrt{K_2 + K_3 + \frac{S}{\pi}}; \quad (2)$$

$$G_2 = \frac{2\pi h T_0 (C_R \rho_R K_1)^2 A_1}{\lambda_R + C_R \rho_R K_1 A_1}; \quad (3)$$

$$G_3 = u^{-2} \left[e^{u^2} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{u^2} \left(u - \frac{u^3}{3} + \frac{u^5}{2!5} - \frac{u^7}{3!7} + \frac{u^9}{4!9} \right) - \frac{2u}{\sqrt{\pi}} - 1 \right]; \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{A_2 + \sqrt{A_2^2 + 4\lambda_R T_0 A_2 A_1^{-1}}}{2C_R \rho_R T_0}; \quad (5)$$

$$A_1 = \ln \frac{4h}{R_1 + \sqrt{K_2 + K_3 + S/\pi}}; \quad (6)$$

$$A_2 = \lambda_n (T_u - T_n) \left(1 + \frac{S}{\pi K_3}\right); \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{2\lambda_n t_p (T_u - T_n) (\pi K_3 + S)}{\pi \rho_n K_3 (0,5A_4 + A_3 + L_n)}; \quad (8)$$

$$K_3 = \frac{A_5 + \sqrt{A_5^2 - 8\lambda_n \rho_{in} t_p R_1^2 (T_u - T_n) (0,5A_4 + A_3 + L_n)}}{\rho_{in} (0,5A_4 + A_3 + L_n)}; \quad (9)$$

$$A_3 = C_R (T_n - T_0); \quad (10)$$

$$A_4 = C_{nR} (T_u - T_n); \quad (11)$$

$$A_5 = 2t_p \left[\frac{\lambda_u (T_\phi - T_u) S}{S - \pi R_2^2} - \lambda_n (T_u - T_n) \right]; \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{aP}{4\pi^2 b S_\phi} e^{-(a+k_\phi) T_\phi \sqrt{\frac{\omega \omega_{L1}}{10\nu}}}; \quad (13)$$

$$u = \sqrt{\frac{C_2 \rho_2 \lambda_2 \tau t_p}{C_1 \rho_1 h}}, \quad (14)$$

здесь: T_i – температуры перехода резистивного материала из одной фазы в другую, факела и окружающей среды; C_i – удельные теплоемкости, λ_i – теплопроводности материалов подложки и пленки при разных температурах T_i ; L_n и L_u – соответственно теплота плавления и испарения; ω – внешняя частота; ω_{L1} – ленгмюровская частота; ν – частота столкновений с нейтралами; P – мощность; τ – длительность импульсов; t_p – время воздействия факельного разряда; h – толщина резистивного слоя; S – площадь резистора, которую необходимо испарить для

доведения величины сопротивления R_i до номинального значения R_n ; остальные – различные коэффициенты.

Очевидно, что при определении величины зазора l для подгонки группы резистивных элементов из одного материала на однотипной подложке ряд параметров остается постоянным. Это физические величины, характеризующие материал пленки и подложки, окружающую среду. Параметры, характеризующие режим подгонки, можно зафиксировать, придав им средние (на основе опытных данных) значения. В этом случае изменением значения l от нуля и выше можно в принципе осуществить подгонку любого резистивного элемента.

При вычислении l для разных элементов будут изменяться лишь данные о конкретном пленочном резисторе как элементе.

Алгоритм подгонки

С учетом вышеописанного нами была разработана программа вычисления оптимальной величины l , в которой предусмотрен одновременный ввод данных. Так физические величины, характеризующие пленку, подложку и окружающую среду, данные о режиме подгонки, а также данные о конкретном резисторе вводятся в первом диалоговом окне программы. При необходимости можно изменить все введенные данные. Программа написана на языке LabVIEW для персональных компьютеров.

Алгоритм работы программы представлен на рис. 1.

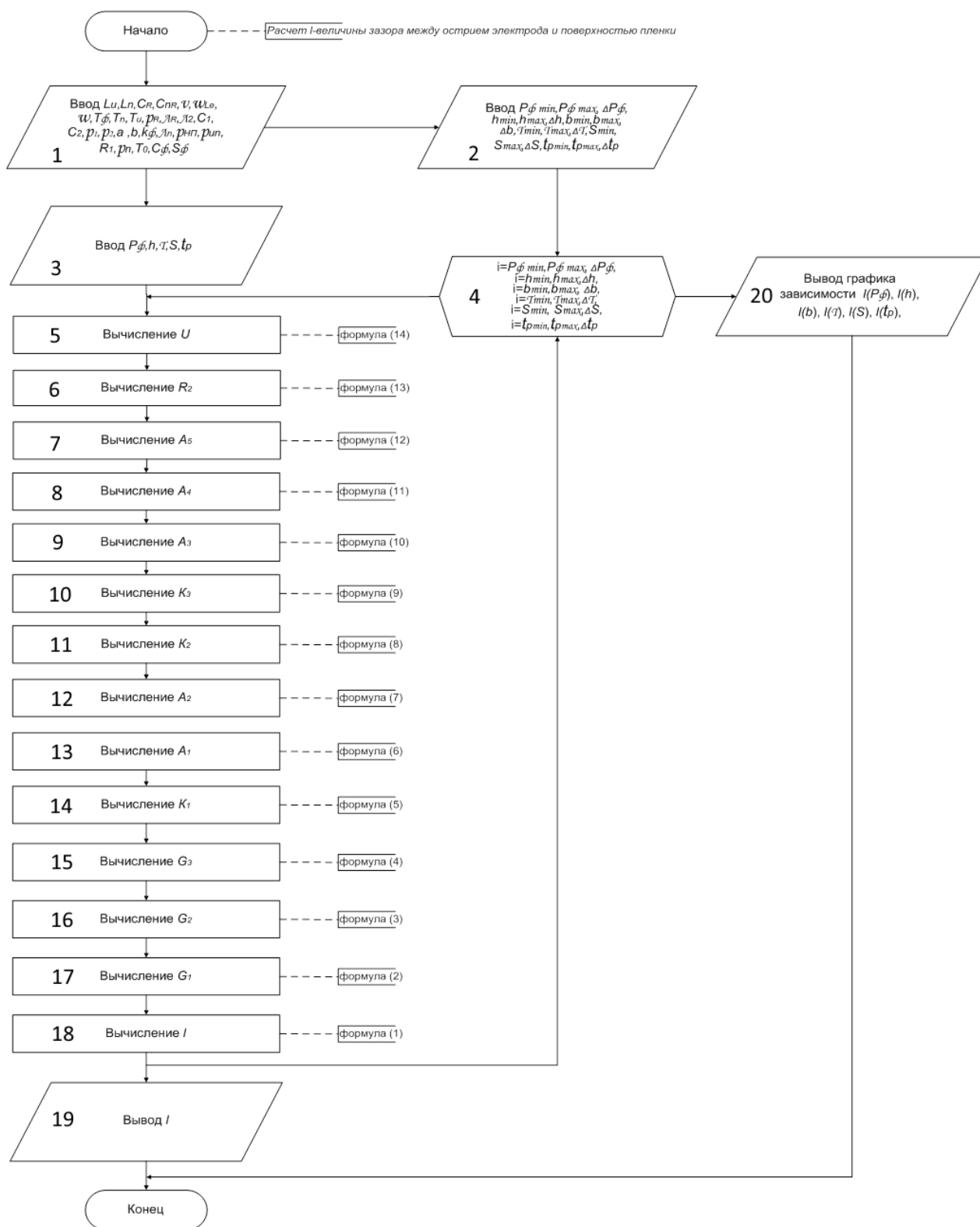


Рис. 1. Алгоритм работы программы

Рассмотрим его. Кроме особенностей, описанных выше, отметим то, что установка элемента в зону подгонки и вычисление l производятся одновременно;

таким образом, время вычисления l прямым образом не учитывается в процессе подгонки. Программа позволяет определять зависимости значения l от ряда параметров воздействующей системы, причем результат выводится в виде графиков, которые можно затем использовать. Кроме этого, предусмотрено вычисление 13 других параметров, входящих в модель подгонки.

Отметим, что при вводе некорректных данных, программа приостановит расчет величины l , при этом в поле, где должно быть значение l , будет присутствовать запись N/A, что означает not available (данные недоступны).

Результаты расчетов

Разработанная программа позволила рассчитать зависимость величины зазора от параметров разряда и конструктивных характеристик подгоняемого элемента.

Результаты расчетов представлены на рис. 2-7.



Рис. 2. Зависимость величины зазора от мощности факельного разряда

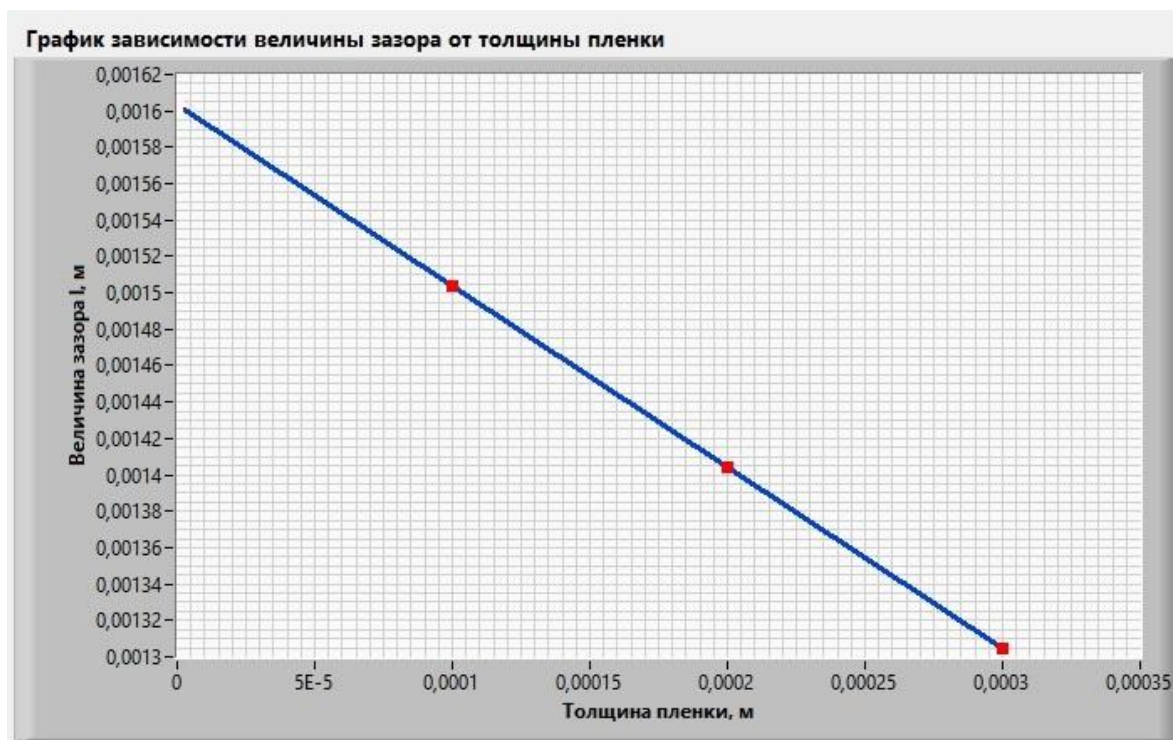


Рис. 3. Зависимость величины зазора от толщины пленки

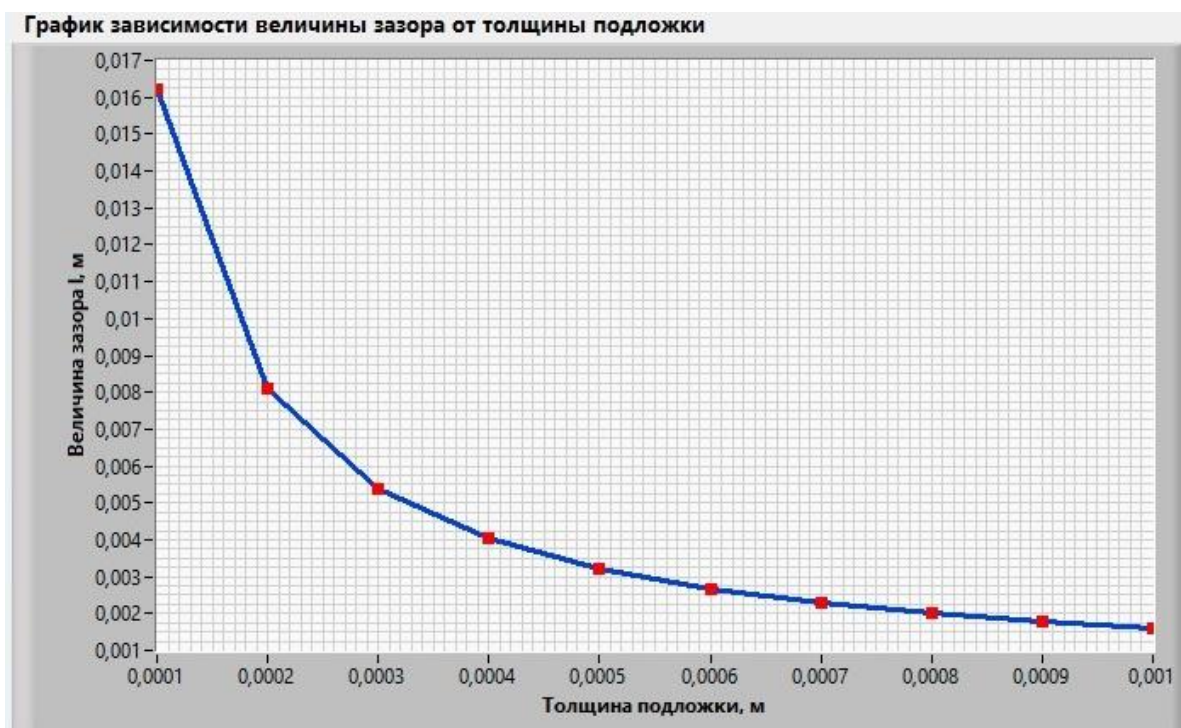


Рис. 4. График зависимости величины зазора от толщины подложки

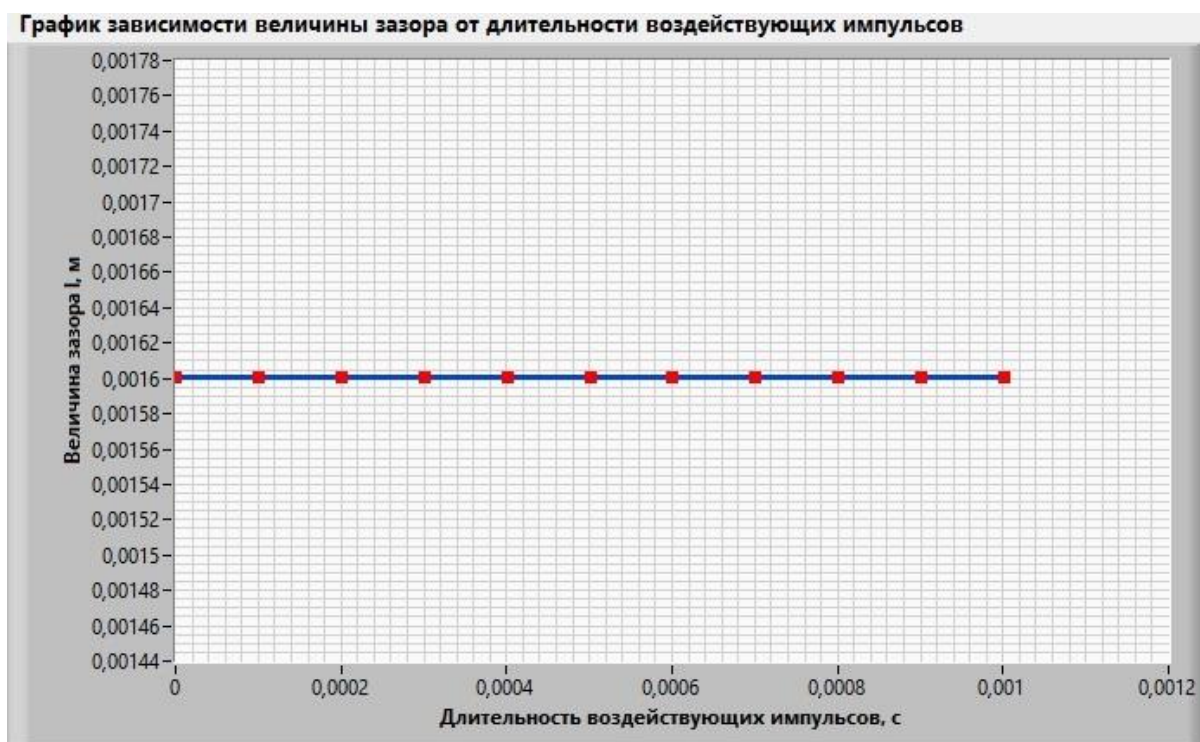


Рис. 5. Зависимость величины зазора от длительности воздействующих импульсов

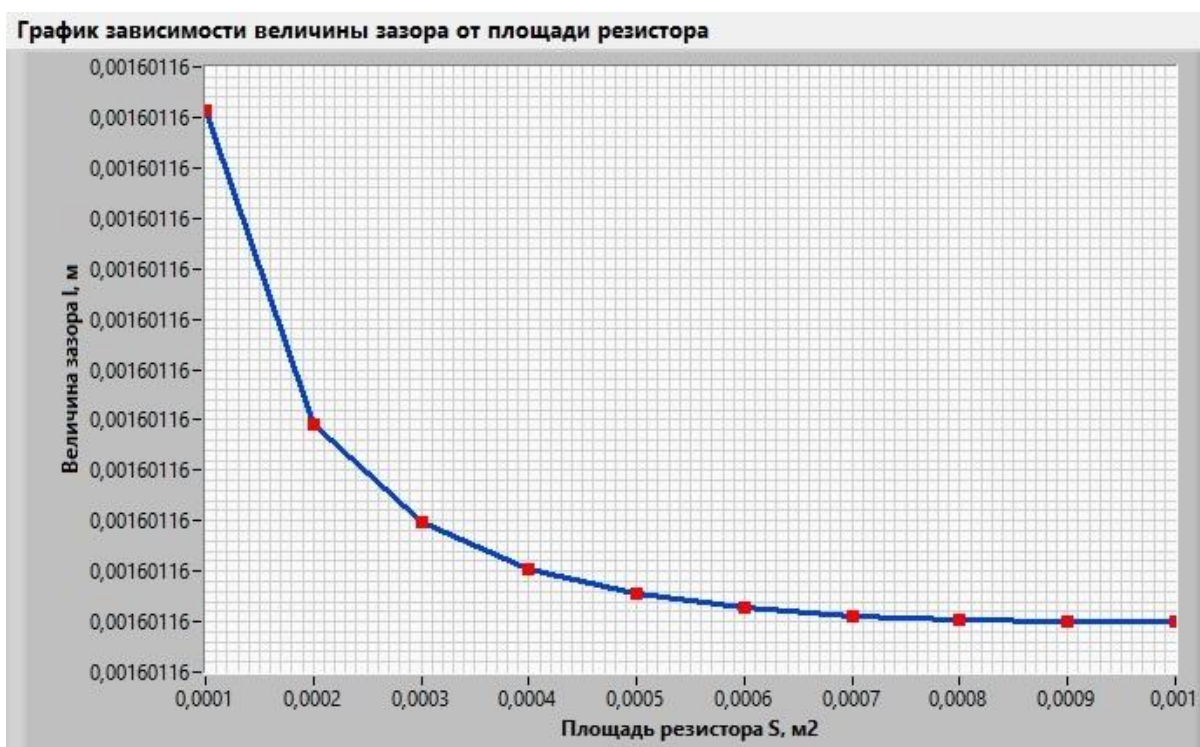


Рис. 6. График зависимости величины зазора от площади резистора



Рис. 7. Зависимость величины зазора от времени воздействия факельного разряда

Как видно из рис. 2, величина зазора линейно зависит от мощности факельного разряда, то есть чем больше мощность, тем больше расстояние, с которого можно осуществлять обработку поверхности резистора.

На рис. 3 график зависимости величины зазора от толщины пленки представляет собой обратную линейную зависимость. Из построенного графика видно, что чем больше толщина пленки, тем меньше зазор между электродом и поверхностью резистора, и это вполне объяснимо, поскольку для обработки и полного локального удаления резистивного материала с более толстой пленки необходим более близкий контакт электрода с пленкой.

Из рис. 4 следует, что чем толще подложка, тем меньше зазор между электродом и подложкой. Согласно рис. 5 величина зазора не зависит от длительности воздействующих импульсов. Из рис. 6 следует, что чем больше

площадь резистора, тем меньше зазор должен быть между электродом и пленкой для обеспечения высокой геометрической точности обработки поверхности резистивной пленки. Согласно рис. 7, чем дольше факельный разряд воздействует на резистивную пленку, тем меньший требуется зазор между электродом и поверхностью резистивной пленки. Связано это скорее всего с тем, что для удаления лишнего резистивного материала с достаточно толстой пленки требуется больше времени на обработку и соответственно меньший зазор для лучшего взаимодействия электрода с пленкой.

Заключение

1. В связи с необходимостью уменьшения массо-габаритных характеристик устройства контроля и управления бортового комплекса обороны было предложено реализовать его на новой конструктивной основе – в виде микросборок с нерегулярной структурой. При этом масса устройства была снижена на 30%, а объем – на 20%. По результатам экспериментальных исследований был выбран метод подгонки высокочастотным факельным разрядом. Это позволило повысить надежность элементов на 40-60%.

2. Построена математическая модель процесса факельной подгонки пленочных элементов микросборок с нерегулярной структурой. Она отличается учетом всех физических характеристик разряда и конструктивно-технологических параметров подгоняемого элемента и подложки.

3. Предложен вычислительный алгоритм реализации математической модели процесса подгонки пленочных элементов микросборок с нерегулярной структурой

на базе факельного разряда. Алгоритм обеспечивает высокую точность расчетов для заданных конструктивных параметров и может быть использован для автоматизации процесса подгонки элементов микросборок и решения задачи управления данным операционным технологическим процессом. Разработана программа на языке LabVIEW определения оптимальной величины зазора между электродом и подгоняемым элементом. Приведены результаты расчетов.

Библиографический список

1. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57879>
2. Шерстнёв Д.В., Маклашов В.А., Тезейкин В.К. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. 2017. № 1. С. 172 - 173.
3. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарёв В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.
4. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие. – М.: Изд-во МАИ, 1998. Т.2. - 248 с.
5. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. – М.: Вузовская книга, 2007. С. 59 - 64.

6. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. - М.: Радио и связь, 1986. С. 36 - 37.
7. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. - 251 с.
8. Маклашов В.А. Модульная технология VPX в технике РЭБ // Радиотехника. 2016. № 1. С. 28 - 31.
9. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Блок контроля и управления лазерной системой // Приборостроение в XXI веке // XIII Международная научно-техническая конференция «Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 22-24 ноября 2017): сборник статей. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. С. 83 - 88.
10. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62310>
11. Иванов И., Чадов И. Содержание и роль радиоэлектронной борьбы в операциях XXI века // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 1. С. 14 - 20.
12. Сучков К.И. Об интерпретации результатов испытаний компонентов радиолокационных станций при оценке рисков ее создания // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57872>
13. Чернобровкин Д.И., Мишанин Н.Д., Пиганов М.Н. Прибор для подгонки тонкопленочных элементов микросхем // Приборы и системы управления. 1978. № 6. С. 45 - 46.

14. Пиганов М.Н., Волков А.В. Подгонка сопротивления толстоплёночных резисторов методом факельного разряда // Техника средств связи. Серия: Технология производства и оборудование. 1985. № 2. С. 29 - 35.
15. Тюлевин С.В., Пиганов М.Н., Шопин Г.П., Столбиков А.В. Устройство для подгонки толстоплёночных резисторов методом факельного разряда // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(2). С. 557 - 560.
16. Пиганов М.Н., Шопин Г.П., Столбиков А.В. Патент № 2371797 РФ, МПК H01C 17/22. Устройство для подгонки толстоплёночных резисторов. Бюлл. № 30, 27.10.2009.
17. Костин А.В., Пиганов М.Н., Столбиков А.В. Математическое моделирование взаимодействия высокочастотного факельного разряда с элементами конструкции радиоаппаратуры // Вестник СГАУ. 2011. № 7. С. 117 - 121.
18. Столбиков А.В., Пиганов М.Н., Костин А.В. Построение математической модели распределения температуры газа вдоль оси канала факельного разряда при взаимодействии с толстоплёночными элементами микросборок // Вестник СГАУ. 2011. № 7. С. 113 - 116.
19. Пиганов М.Н., Новомейский Д.Н. Моделирование процесса подгонки толстоплёночных резисторов методом факельного разряда // Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018): сборник трудов. - Самара: Новая техника, 2018. С. 1698 - 1705.

20. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62213>
21. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда. Сборник: Физика газоразрядной плазмы. Вып. 1. – М.: Автомиздат, 1968. С. 39 - 47.
22. Трехов Е.С., Фетисов Е.П. К теории высокочастотного факельного разряда в воздухе. Сборник: Физика газоразрядной плазмы. Вып. 2. – М.: Автомиздат, 1969. С. 148 - 155.