МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет (институт) информационных технологий и электроники (наименование)

Кафедра «Нано- и микроэлектроника» (наименование)

Направление подготовки 11.04.04. «Электроника и наноэлектроника» (код и наименование)

Магистерская программа Нано- и микроэлектроника (наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов

Студент 23ПДм1 (номер группы) 3.06.25г. (подпись, дата) Малышев Сергей Алексеевич (ФИО полностью)

Научный руководитель
Зам. заведующего кафедрой НиМЭ, ПГУ (должность, наименование организации) 3.06.25г. (подпись, дата) А.Н. Головяшкин (инициалы, фамилия)

Рецензент
ООО «РАСТ+», к.т.н., директор (должность, наименование организации) 10.06.25г. (подпись, дата) Ю.В. Перекусихин (инициалы, фамилия)

Нормоконтролер ст.преподаватель (должность) 16.06.25 (подпись, дата) Т. Н. Рыжова (инициалы, фамилия)

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 9.06.25 №10)

Заведующий кафедрой НиМЭ
ПГУ (должность, наименование организации) 9.06.25 (подпись, дата) И.А. Пронин (инициалы, фамилия)

Работа защищена с оценкой отл. (протокол ГЭК от 18.06.25 № 4)

Секретарь ГЭК
Доцент (должность, наименование организации) 18.06.25 (подпись, дата) А.А. Вольсков (инициалы, фамилия)

2025

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 128 страниц, 34 рисунков, 8 таблиц, списка использованных источников из 15 наименований и 5 приложений.

Ключевые слова: тонкоплёночный конденсатор, дискретная подгонка, удельная ёмкость, технологическая погрешность, алгоритм расчёта, топология спирали, тонкоплёночная индуктивность, добротность, собственная резонансная частота, *FEM*, *FDM*, эмпирические методы, программное обеспечение, проектирование, миниатюризация.

Цель исследования – разработать методику расчёта параметров тонкоплёночных конденсаторов, предусматривающую дискретную подгонку готовой конструкции, и реализовать её в виде прикладного программного обеспечения. Кроме того, была поставлена задача объединить в едином пакете алгоритмы расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных элементов с учётом требований к добротности, резонансной частоте и занимаемой площади.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих алгоритмов расчёта тонкоплёночных конденсаторов: классических аналитических моделей, численных методов (*FEM*, *FDM*), методов машинного обучения и эмпирических моделей.

2. Разработка универсального алгоритма расчёта тонкоплёночных конденсаторов с учётом технологической погрешности, температурной стабильности, старения плёнок и возможности дискретной подгонки по конечным секциям.

3. Построение методики расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных спиралей, обеспечивающей максимальную добротность при заданных параметрах или минимальную занимаемую площадь при заданном номинале индуктивности.

4. Реализация программного обеспечения, включающего указанные алгоритмы, и проверка корректности вычислений на примерах.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

1 Анализ существующих алгоритмов 8

2 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора 11

3 Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов 19

4 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов .. 26

4.1 Расчет топологии индуктивности с максимально возможной добротностью 31

4.2 Расчет топологии индуктивности на минимальной занимаемой площади 33

4.3 Расчет топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности 34

5 Обзор программного обеспечения 38

5.1 Общие сведения и функциональное назначение 38

5.2 Функциональные возможности и интерфейс 39

5.3 Проверка расчётов и различные уведомления 49

6 Организация производственной безопасности при вакуумном напылении 60

Заключение 63

Список использованных источников 67

Приложение А. Задание на выпускную квалификационную работу 69

Приложение Б. Список публикаций 73

Приложение В. Программа расчета параметров конденсатора и индуктивности в среде программирования Visual Studio 75

Приложение Г. Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» 111

Приложение Д. Презентация ВКР 114

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного развития микроэлектроники и высокочастотных устройств требования к размерам, точности и надёжности пассивных элементов (конденсаторов и индуктивностей) постоянно возрастают. Тонкоплёночные технологии, предусматривающие формирование электрических свойств компонентов посредством нанесения тонких слоёв металлов и диэлектриков на различные подложки, интенсивно применяются при разработке гибких сенсоров, СВЧ-фильтров, интегральных схем и систем беспроводной связи. При этом проектирование тонкоплёночных конденсаторов и индуктивных элементов часто требует учёта большого количества физических и технологических факторов, что осложняет выполнение расчётов вручную и приводит к значительным временным затратам.

Численные методы обеспечивают высокую точность моделирования, но требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. При этом на практике технологические погрешности (колебания толщины диэлектрика, изменение диэлектрической проницаемости при колебаниях температуры, шероховатость поверхности и допуски фотолитографии) существенно влияют на электрические параметры тонкоплёночных пассивных элементов. В связи с этим актуальной задачей является разработка универсального алгоритма, позволяющего учитывать технологические допуски и обеспечивать дискретную подгонку параметров конечной конструкции.

Практическая значимость исследования определяется необходимостью сокращения трудозатрат при проектировании тонкоплёночных высокоточных конденсаторов и индуктивных элементов, а также снижением числа экспериментальных итераций. Автоматизация расчётов позволит получать готовые к производству конструкции с высокой вероятностью попадания в требуемый диапазон параметров без использования дорогостоящих лабораторных комплексов. Кроме того, созданный программный инструмент может применяться в образовательном процессе для наглядного

демонстрирования влияния геометрических и технологических параметров на электрические характеристики тонкоплёночных структур.

Объектом исследования являются тонкоплёночные пассивные элементы (конденсаторы и индуктивные спирали).

Предметом исследования выступают алгоритмы расчёта электрических параметров и топологии указанных элементов с учётом технологических допусков, а также программная реализация данных алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Разработан комплексный метод дискретной подгонки тонкоплёночных конденсаторов.

2. Создан программный комплекс, автоматически генерирующий чертежи тонкоплёночных пассивных элементов с учётом технологических ограничений.

Методы исследования:

1. Аналитические – использование базовой формулы плоского конденсатора для оценки зависимости ёмкости от геометрических параметров и материала диэлектрика.

2. Эмпирические – применение параметрических зависимостей, полученных в ходе экспериментальных исследований, для оценки влияния технологических параметров на добротность и параметры конденсатора/индуктивности.

3. Дискретная подгонка – разработка формул определения числа подстроечных секций, выбора номинала «изготовления» и расчёта минимального шага подгонки с учётом технологической погрешности и допуска на воспроизведение удельной ёмкости.

4. Алгоритмическая реализация – программирование последовательности вычислений в среде высокого уровня, позволяющее пользователю вводить исходные параметры и получать комплекс расчётов: геометрические размеры обкладок, параметры слоя диэлектрика, число и ёмкость подстроечных секций, занимаемую площадь, а также топологию спирали

индуктивности (число витков, внешний и внутренний диаметры, добротность, частоту собственного резонанса).

Результаты работы:

1. Универсальный алгоритм расчёта тонкоплёночного конденсатора. Алгоритм позволяет:

– рассчитать номинал «изготовления» $C_{изг}$ так, чтобы минимально возможная ёмкость при худших допусковых значениях не была ниже требуемой;

– определить число подстроечных секций n и ёмкость одной секции C_c;

– рассчитать геометрические размеры обкладок основной и подстроечной частей. Результаты позволяют оценить занимаемую площадь конструкции для последующего анализа компоновки;

– представленный алгоритм протестирован на примере расчёта тонкоплёночного конденсатора номиналом 1000 пФ с допуском 5%, температурной погрешностью 1,6%, погрешностью старения 0,5% и технологической погрешностью 15%. Итогом стало определение номинала изготовления 1176,5 пФ, трёх подстроечных секций по 100 пФ каждая и общей занимаемой площади 21,72 мм^2.

2. Методика расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных элементов. Разработаны три варианта расчёта:

– по заданной величине индуктивности и рабочей частоте с максимизацией добротности; для круглых спиралей определено, что при $\alpha = 9$ (максимальное отношение ширины токопровода к шагу), добротность достигает наилучших значений;

– по минимальной занимаемой площади при заданном номинале, что достигается за счёт квадратной формы спирали, минимального α;

– по заданным значениям и добротности, что реализуется построением горизонтальных линий на номограммах зависимости.

3. Программное обеспечение. На основе разработанных алгоритмов создано приложение, позволяющее с минимальным вмешательством

пользователя автоматически рассчитывать параметры конденсатора или индуктивного элемента. Интерактивный выбор оптимального набора параметров и готовый чертеж индивидуального конденсатора высокой точности.

Таким образом, поставленные цели и задачи выполнены: разработана универсальная методика расчёта тонкоплёночных конденсаторов и индуктивных элементов, реализована в виде программного продукта, проверена на примерах и готова к внедрению в учебный и производственный процессы. Использование предложенных алгоритмов позволяет существенно сократить время проектирования, а также снизить количество дорогостоящих опытных образцов.

1 Анализ существующих алгоритмов

Аналитические методы базируются на математических моделях, которые описывают поведение конденсаторов. Эти методы используют основные физические уравнения и законы электростатики. Классическая модель плоского конденсатора используется для расчета ёмкости конденсатора с параллельными пластинами. Ёмкость определяется по формуле:

$$C=\epsilon A/d, \quad (1.1)$$

где є – диэлектрическая проницаемость материала между пластинами, A – площадь пластин, d – расстояние между пластинами.

Преимущества этой модели заключаются в её простоте и быстроте вычислений. Однако она становится менее точной при усложнении геометрии или наличии краевых эффектов. Для более точных расчетов учитываются краевые эффекты, которые становятся значимыми при малых размерах конденсаторов. Например, работы Б. Разави "*Fundamentals of Microelectronics*" рассматривают основные подходы к аналитическому расчёту ёмкости конденсаторов, подчёркивая важность учёта краевых эффектов в миниатюрных устройствах.

Численные методы, такие как метод конечных элементов (*FEM*), обеспечивают более высокую точность, особенно при расчете конденсаторов сложной формы. Эти методы включают разбиение структуры на небольшие элементы и решение дифференциальных уравнений для каждого элемента. Метод конечных элементов (*FEM*) является мощным инструментом для моделирования электрических полей в сложных структурах. Он позволяет учитывать различные геометрические и материальные параметры, что значительно повышает точность расчётов. Примером может служить работа Зиенкевича и Тейлора "*The Finite Element Method*", где подробно описаны принципы и применение *FEM* в различных инженерных задачах.

Метод конечных разностей (*FDM*) используется для аппроксимации уравнений, описывающих распределение потенциала и плотности заряда, что также позволяет достигнуть высокой точности расчётов. Этот метод разбивает пространство на сетку и решает уравнения на этой сетке, что делает его полезным для моделирования сложных полей.

Современные методы на основе машинного обучения, такие как нейронные сети и регрессионные модели, позволяют учитывать большое количество факторов и взаимодействий. Эти методы применяются для прогнозирования параметров конденсаторов на основе обучающих выборок данных. Например, нейронные сети могут обучаться на данных о ранее рассчитанных или измеренных конденсаторах и затем предсказывать параметры новых устройств. Это особенно полезно в условиях, когда аналитические или численные методы затруднительны или требуют значительных вычислительных ресурсов. Статья "*Machine Learning in Electronic Design Automation*" обсуждает применение машинного обучения в области разработки электронных компонентов, демонстрируя их эффективность и гибкость. Эти методы позволяют быстро адаптироваться к изменениям в дизайне и материалах, что делает их крайне полезными для разработки современных электронных устройств.

Эмпирические методы, основанные на экспериментальных данных, включают использование эмпирических формул и методов параметрической подгонки. Эти методы полезны при отсутствии точных теоретических моделей и позволяют получать практически значимые результаты без сложных вычислений. Примером может служить работа "*Empirical Models for the Prediction of Capacitor Performance*" Смитта и других авторов, где описываются методики использования экспериментальных данных для прогнозирования параметров конденсаторов. Эти методы включают сбор данных об измерениях и нахождение зависимостей между параметрами, что позволяет эффективно предсказывать поведение конденсаторов в различных условиях.

Сравнительный анализ показывает, что численные методы, такие как *FEM*, обеспечивают высокую точность за счёт детального моделирования, но требуют значительных вычислительных ресурсов. Аналитические методы быстрее в вычислениях, но менее точны при сложной геометрии. Методы машинного обучения и численные методы обладают гибкостью и могут быть адаптированы под различные конфигурации и материалы, что делает их универсальными инструментами для расчета тонкоплёночных конденсаторов. Каждый из рассмотренных методов имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного алгоритма расчета тонкоплёночных конденсаторов зависит от требований к точности, скорости и доступных ресурсов. Важно учитывать особенности конкретной задачи и, возможно, комбинировать различные подходы для достижения оптимальных результатов. Для практического применения рекомендуется использовать гибридные подходы, сочетающие численные методы и машинное обучение, чтобы достичь наилучшего баланса между точностью и эффективностью.

Таким образом, рассмотрение различных методов расчета тонкоплёночных конденсаторов демонстрирует широкий спектр доступных инструментов, каждый из которых имеет свои специфические преимущества и сферы применения. Аналитические методы подходят для быстрых и простых расчётов, численные методы обеспечивают высокую точность для сложных структур, методы машинного обучения предлагают гибкость и адаптивность, а эмпирические методы позволяют использовать накопленные экспериментальные данные для быстрого прогнозирования параметров.

2 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора

Для написания программы, необходимо для начала разработать алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора.

Проведённый анализ научно-технической литературы показал, что современная тонкоплёночная технология позволяет изготавливать конденсаторы с погрешностью номинала от 10% до 20 %. Поэтому для демонстрационного примера расчёта по разработанному алгоритму зададим погрешность номинала $\Delta C_{техн}$=15%.

Так же очень важно правильно выбрать материал. Материалы для изготовления диэлектрических плёнок конденсаторов должны обладать следующими свойствами:

– максимальное значение относительной диэлектрической проницаемости, удельного электрического сопротивления и электрической прочности;

– низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь и температурного коэффициента ёмкости (ТКЕ или ТКС);

– высокое значение рабочей частоты;

– минимальную гигроскопичность;

– хорошую адгезию к материалам подложки и обкладок;

– минимальное значение коэффициента старения.

Для изготовления тонкоплёночных конденсаторов с ёмкостью 10-1000 пФ широко используют боросиликатное стекло, монооκись германия и кремния, электровакуумные стекла С41-1 и С44-1, позволяющее изготавливать конденсаторы с ёмкостью до 10000 пФ. В микросхемах, изготавливаемых по танталовой технологии, в качестве диэлектрика используется пятиокись тантала; при этом удается получить ёмкость до 0,1 мкф.

Характеристики некоторых диэлектрических материалов тонкоплёночных конденсаторов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры материалов тонкоплёночных конденсаторов

Материал диэлектрика	Материал обкладок	Удельное сопротивление обкладок, Ом/см	Удельная ёмкость C_0, пФ/см^2	Электр.прочтность $E_{пр.}$*10^6 В/см^2	Диэлектрическая проницаемость ε	*tg* δ *f*=1кГц	Рабочая частота, мГц	ТКЕ*10^{-4} 1/град в интервале температур -60° - +125°С	Коэффициент старения 1/час·10^{-6}
Моноокись кремния (ГОСТ 5.634-70)	Алюминий А-99 (ГОСТ 10969-64)	0,2	5000-10000	2-3	5,0-6,0	0,01-0,02	500	3,5	1
Моноокись германия (ГОСТ 19602-74)			5000-15000	10	11-12	0,005-0,007	500	1,5	0.5
Боросиликатное стекло (ЕТО.035.щ15 ТУ)			2500--15000	3-4	4	0,001-0,0015	300	4	1.7
Стекло электровакуумное С44-1 (НПО.027.600)			4000 - 30000	3-4	5,2	0,003	300	4	4
Стекло электровакуумное С41-1 (НПО.027.590)			20000 - 40000			0,002-0,003	300	1,5	4
Ta_2O_5 (электрохимическое анодирование)	Тантал ТВЧ (РЭТУ 1244-67), нижняя обкладка	1-100	10000--60000	4,0-4,5	23	0,02-0,03	10	4	3
	Алюминий А-99 (ГОСТ 10969-64), верхняя обкладка	0,2	5000--30000	2-3	10-11	0,01-0,02	0,1	4	3

Обкладки конденсаторов должны иметь высокую проводимость, коррозионную стойкость, технологическую совместимость с материалом подложки и диэлектрика конденсатора: ТКЛР, близкие к ТКЛР подложки и диэлектрика, хорошую адгезию к подложке и диэлектрику, высокую механическую прочность.

Наилучшим материалом для обкладок конденсаторов является алюминий, который, однако, имеет плохую адгезию к подложке. Для предотвращения отслаивания нижней обкладки вначале напыляют подслой титана или ванадия. Верхняя обкладка, напыляемая на диэлектрик, не требует подслоя. Применение золота для обкладок не рекомендуется из-за высокой подвижности атомов и возможной диффузии сквозь диэлектрик, приводящей к короткому замыканию обкладок.

Для примера расчёта, пользователь выбирает следующие параметры:

$C_{исх}$=1000 пФ, $\Delta C_{треб}$=5%, T_{max} = 125°С, γc_0 =4%,

Материал диэлектрика – моноокись германия, материал обкладок – Алюминий А-99. Параметры материалов: ε = 11.5; $tg\delta_{диэл}$=0.006; $E_{пр}$=10^7 В/см; ТКЕ=$1.5\cdot10^{-4}$ 1/°С, C_0=100 пФ/мм^2, $\gamma c_{ст}$=0.5, $\rho_S = 0.2$ Ом.

В первую очередь нужно рассчитать допустимую погрешность площади конденсатора с требуемой точностью по формуле (2.1):

$$\gamma_{S\text{доп}} = \Delta C_{треб} - \gamma c_0 - \gamma_{Ct} - \gamma c_{ст} \cdot 100\%, \qquad (2.1)$$

где $\gamma c_{ст}$ – относительная погрешность, обусловленная старением плёнок конденсатора (зависит от материала и метода защиты и обычно не превышает 2 – 3%);

γc_0 – относительная погрешность удельной ёмкости, характеризующая воспроизводимость удельной ёмкости в условиях данного производства (зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика и обычно составляет 3-5%);

γ_{Ct} – относительная температурная погрешность рассчитывается по формуле (2.2):

$$\gamma_{Ct} = \text{ТК}C \cdot (T_{max} - 20°\text{C}) \cdot 100\% \qquad (2.2)$$

Расчет относительной температурной погрешности осуществляется, используя формулу (2.2):

$$\gamma_{Ct} = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot (125\text{-}20) \cdot 100\% = 1.6\%$$

Теперь подставим в формулу (2.1) значения для нашего материала для расчёта допустимой погрешности площади конденсатора:

$$\gamma_{S\text{доп}} = 0.05 - 0.005 - 0.016 - 0.04 \cdot 100\% = -1.1\%$$

Так как у нас получилось число меньшее, чем 0, следовательно изготовление конденсатора простой формы с требуемой точностью невозможно. Для получения требуемой точности будем использовать подгоняемые плёночных конденсаторы. Выберем конструкцию, подгонка в которой осуществляется путём отрезания подгоночных секций.

После выбора метода подгонки, нам необходимо найти такой номинал, у которого значение ни при каких обстоятельствах не может быть меньше $C_{\text{исх.}}$ Назовём его номинал на изготовление $C_{\text{изг}}$. Найти этот номинал можно из формулы (2.3), где мы рассчитываем минимально возможную емкость.

$$C_{min} = C_{\text{изг}} - \Delta C_{max} = C_{\text{исх}}, \qquad (2.3)$$

где ΔC_{max} – максимальная погрешность, которая высчитывается по формуле (2.4).

$$\Delta C_{max} = C_{\text{изг}} \cdot \Delta C_{\text{техн}} \qquad (2.4)$$

Из (2.3) формулы, мы можем легко выразить $C_{\text{изг.}}$, составив линейное уравнение:

$$x - x \cdot \Delta C_{\text{техн}} = C_{\text{исх}}$$

Подставив наши значения в уравнение, найдём $C_{\text{изг}}$:

$$x - x \cdot 0.15 = 1000$$

$$C_{\text{изг}} = 1176.5 \text{ пФ}$$

Теперь мы можем рассчитать формулу (2.4):

$$\Delta C_{max} = 1176.5 \cdot 0.15 = 176.5 \text{ пФ}$$

Далее нужно посчитать номинал, который мы получим при максимально допустимой точности по формуле (2.5):

$$C_{max} = C_{изг} + \Delta C_{max} \quad (2.5)$$

C_{max} = 1176.5 + 176.5= 1353 пФ

Шаг подгонки, равный емкости одной секции, должен быть не больше поля допуска: $\Delta C = C_{max} - C_{исх}$ = 1353-1000 = 353 пФ

Число подстраиваемых секций можно определить из отношения (2.6):

$$n = \Delta C / C_{0min}, \quad (2.6)$$

где C_{0min} – удельная емкость, при которой конденсатор будет занимать минимальную площадь на подложке, находится по формуле (2.7):

$$C_{0min} = C_0 S_{min}, \quad (2.7)$$

где S_{min} – минимальная площадь подложки, равная 1 мм^2.

Рассчитаем C_{0min} использую формулу (2.7):

$$C_{0min} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ пФ}$$

Вернёмся к формуле (2.6):

$$n = 353/100 = 3.5$$

Округляем до целого, а значит кол-во секций у нас равно 3. Мы получили максимально возможное кол-во секций. Для изготовления конденсатора с точностью 5%, нам необходимо знать какой минимальный номинал нас устоит, для этого воспользуемся формулой (2.8):

$$C_{треб} = C_{исх} + \Delta C_{треб} \quad (2.8)$$

$$C_{треб} = 1000+50 = 1050 \text{ пФ}$$

При использовании трёх секций, ёмкость одной секции у нас будет составлять C_c= 100 пФ.

Мы можем взять две секции по $C_c = \frac{C_{0min} \cdot n_{max}}{n}$ = 150 пФ.

Так же мы можем взять одну секцию $C_c = \Delta C$, но у неё есть ряд недостатков. Используя одну секцию, невозможно получить точность выше 5%, такую высокую точность мы можем получить только при максимально возможном количестве секций. Также использование конструкции с одной подгоночной секцией, при производстве могут появится какие-либо факторы, которые не были учтены и такой конденсатор не сможет добиться заданной точности.

Подставив в формулу (2.9), найдём значения толщины диэлектрика d:

$$d = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{C_0} \quad (2.9)$$

$$d = \frac{11.5 \cdot 8.85 \cdot 10^{-3}}{100} = 1.02 \text{ мкм}$$

Подставив d в формулу (2.10), получим значение C_{0V}:

$$C_{0V} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{d}, \quad (2.10)$$

$$C_{0V} = \frac{8.85 \cdot 10^{-3} \cdot 11.5}{0.00102} = 100 \text{ пФ/мм}^2$$

Далее необходимо найти удельную емкость, обусловленную ограничением минимальной площади, нам понадобится формула (2.11).

$$C_{0\min}{}' = \frac{C_{\text{исх}}}{3(2n-1)} \quad (2.11)$$

$$C_{0\min}{}' = \frac{1000}{3(2 \cdot 3-1)} = 66.6 \text{ пФ/мм}^2$$

После выполненных расчётов, нам необходимо выбрать минимальное значение из $C_{0\min}{}'$ и C_{0V}, которое и будет расчётным значением удельной ёмкости C_0.

$$C_0 = 66.6 \text{ пФ/мм}^2$$

С учётом поля допуска на технологическое воспроизведение удельной ёмкости диэлектрической плёнки минимальное значение C_0 определим по формуле (2.12).

$$C_0^{\min} = C_0\left(1 - \frac{\gamma_{C0}}{100\%}\right) \quad (2.12)$$

$$C_0^{\min} = 66.6 \cdot \left(1 - \frac{5\%}{100\%}\right) = 63.27 \text{ пФ/мм}^2$$

Площадь верхней обкладки вместе с подгоночными секциями определяется по формуле (2.13).

$$S_{\max} = \frac{C_{\min}}{C_0^{\min}} \quad (2.13)$$

$$S_{\max} = \frac{950}{63.27} = 15.02 \text{ мм}^2$$

Расчет коэффициента, учитывающего краевой эффект осуществляется с помощью формулы (2.14):

$$K = \begin{cases} 1; C / C_0 \geq 5 \text{ мм}^2 \\ 1{,}3 - 0{,}06 \cdot C / C_0; 1 \leq C / C_0 < 5 \text{ мм}^2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Площадь одной секции конденсатора сложной формы находиться по формуле (2.15).

$$S_C = \frac{C_C}{C_0^{\max}}, \quad (2.15)$$

где

$$C_0^{\max} = C_0(1 + \frac{\gamma_{C_0}}{100\%}) \quad (2.16)$$

$$C_0^{\max} = 66.6 \cdot (1 + \frac{5\%}{100\%}) = 69.93 \frac{\text{пФ}}{\text{мм}^2}$$

$$S_C = \frac{100}{69.93} = 1.43 \text{ мм}^2$$

Площадь основной обкладки нерегулируемой части конденсатора определяется соотношением (2.17):

$$S_{\text{осн}} = S_{\max} - n \cdot S_c \quad (2.17)$$

$$S_{\text{осн}} = 15.02 - 3 \cdot 1.43 = 10.73 \text{ мм}^2$$

Размеры сторон верхней обкладки конденсатора определяются формулами (2.18) и (2.19):

$$L_1 = \sqrt{(\frac{\Delta L}{2})^2 \cdot (1 + K_\phi)^2 + S_{\text{осн}} \cdot K_\text{ф}} - \frac{\Delta L}{2}(1 + K_\text{ф}) \quad (2.18)$$

$$B_1 = \sqrt{(\frac{\Delta L}{2})^2 \cdot \frac{(1 + K_\phi)^2}{K_\phi^{\,2}} + \frac{S_{\text{осн}}}{K_\text{ф}}} - \frac{\Delta L}{2}(1 + K_\text{ф}) \quad (2.19)$$

Подставив значения в формулы (2.18) и (2.19), получим значения:

$$L_1 = \sqrt{(\frac{0.01}{2})^2 \cdot (1 + 1)^2 + 10.73 \cdot 1} - \frac{0.01}{2}(1 + 1) = 3.26 \text{ мм}$$

$$B_1 = \sqrt{(\frac{0.01}{2})^2 \cdot \frac{(1 + 1)^2}{1^2} + \frac{10.73}{1}} - \frac{0.01}{2}(1 + 1) = 3.26 \text{ мм}$$

Чтобы определить размер секции, воспользуемся формулой (2.20).

$$L_c = B_c = \sqrt{S_c} \tag{2.20}$$

$$L_c = B_c = \sqrt{1.43} = 1.19 \text{ мм}$$

Округлим значения L_c и B_c до 1.2 мм.

Размер нижней обкладки подгоняемого конденсатора определяется по формуле (2.21).

$$L_{\text{Н}} = B_{\text{Н}} = L_1 + L_c \cdot 2/m, \tag{2.21}$$

где

$$m = \begin{cases} 1; n \geq 5 \\ 2; n < 5 \end{cases} \tag{2.22}$$

Так как у нас n=3, из формулы (2.22) следует, что m=2.

Для расчёта длины и ширины нижней обкладки конденсатора подставим полученные значения в формулу (2.21).

$L_{\text{Н}} = B_{\text{Н}} = 3.26+1.2 \cdot 2/2=4.46$ мм

Размеры диэлектрика с учетом допуска на перекрытие f = 0.1 мм:

$L_{\text{Д}} = B_{\text{Д}} = L_{\text{Н}} + 2f = 4.46+2 \cdot 0.1=4.66$ мм

Площадь, занимаемая конденсатором:

$S_{\text{Д}} = L_{\text{Д}} \cdot B_{\text{Д}} = 4.66 \cdot 4.66 = 21.72$ мм^2.

3 Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов

По тонкоплёночной технологии индуктивность реализуется в виде так называемой круглой или квадратной спирали, которая вначале формируется вакуумными методами напыления на диэлектрической подложке, а затем, для увеличения добротности спирали, её витки наращивают электрохимическим способом до толщины 10-30 мкм [1-2]. Поэтому термин «тонкоплёночная индуктивность» следует считать условным. Кроме того, расчёт этих элементов сопряжён с большими погрешностями. По этим причинам в тонкоплёночных интегральных микросхемах (ИМС) и микросборках (МСБ) они практически не используются. Однако в настоящее время возникла необходимость возобновить активное применение тонкоплёночных микросхем и микросборок в специальных радиотехнических системах и изделиях электронной техники из-за их высокой помехозащищённости, а исключение индуктивностей из схемотехнических решений усложняет устройства и, в ряде случаев, ограничивает функциональные возможности. Поэтому возникла необходимость восстановить утраченную компетенцию по проектированию и применению тонкоплёночных индуктивных элементов.

Конструкция индуктивности определяется следующими параметрами: внешний и внутренний размеры (диаметр или сторона квадрата) спирали D и d, соответственно; расстояние между витками p; ширина b и толщина токопровода h. Для расчета топологии индуктивности необходимо определить однозначное соответствие между ее электрическими характеристиками (индуктивность L, добротность Q, собственная резонансная частота f_0) и конструктивными параметрами. При применении обычных способов расчёта полученные результаты плохо согласуются с экспериментом, особенно в отношении добротности. Поэтому при конструировании ИМС и МСБ необходимо применять специальные методы для подстройки индуктивности и задавать большие запасы добротности. Но в этом случае увеличиваются габариты и вес устройства. Ниже приводится и обосновывается методика

инженерного расчета топологии тонкопленочной индуктивности, позволяющая избежать эти недостатки.

Методика расчета.

Зависимость индуктивности от ее конструктивных параметров определяли на физической модели тонкопленочной микросхемы, геометрические размеры спирали которой увеличены в 20 раз. Основные принципы построения физической модели изложены в [3]. Результаты моделирования зависимости индуктивности, собственной резонансной частоты и параметра η от конструктивных параметров, представленные в виде номограмм, приведены на рисунках 3.1, 3.2 для круглой и квадратной спирали [4].

Данные номограммы построены для получения максимально возможной удельной индуктивности. Для этого расстояние между витками и внутренний диаметр элемента должны быть минимально возможными: p = 100 мкм и d = 500 мкм.

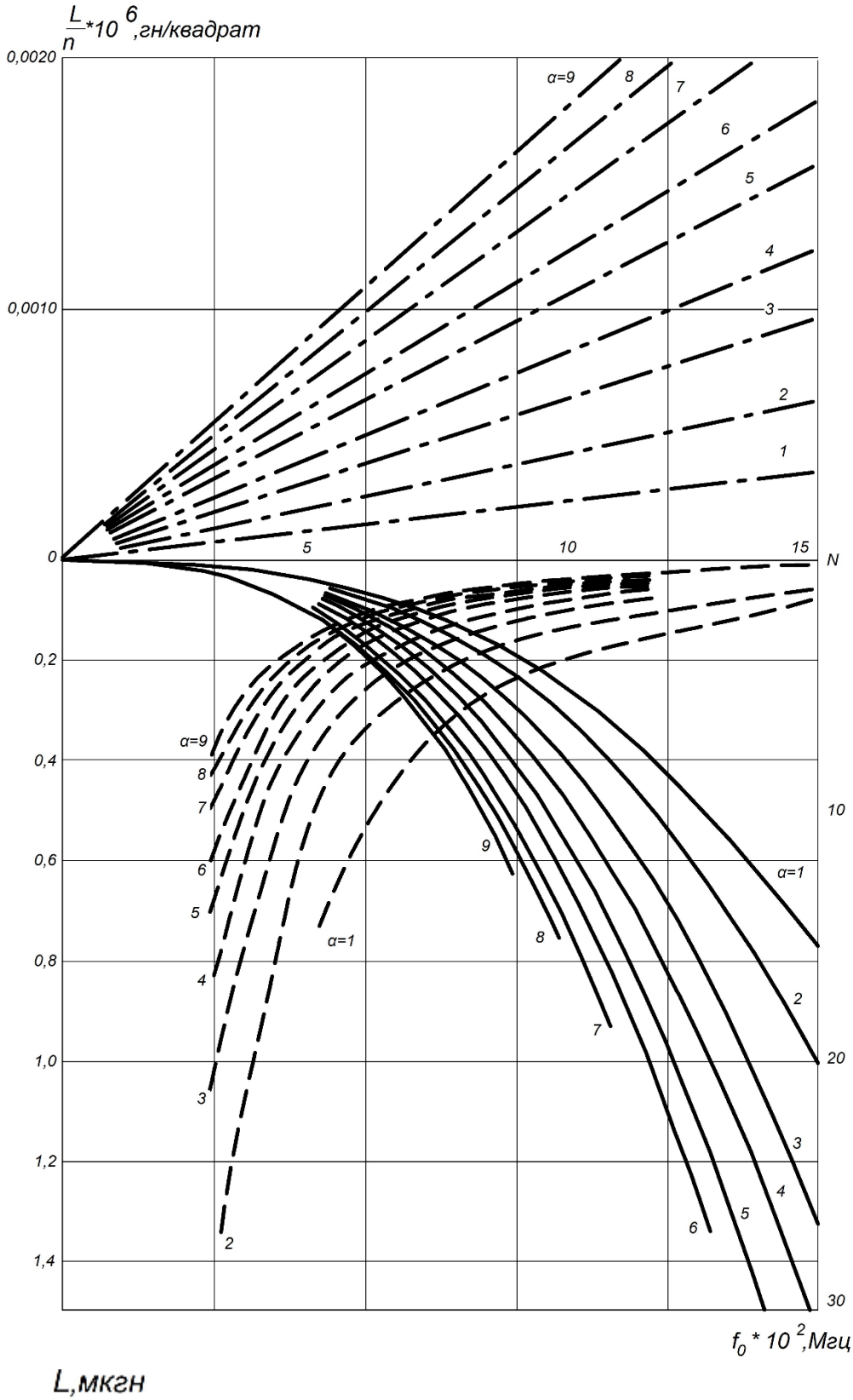


Рисунок 3.1 – Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра η=*L*/*n* (штрих-пунктирные) круглой спирали от числа витков *N* при различных значениях α.

Для определения добротности тонкопленочной спирали введем параметр

$$\eta = \frac{L}{n} \tag{3.1}$$

где L – индуктивность спирали, Гн;

n – число квадратов токопровода спирали.

Величина добротности в этом случае определяется по формуле

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)}, \tag{3.2}$$

где ω – угловая рабочая частота, сек$^{-1}$;

ρ_0 (ω) – удельное сопротивление токопровода, Ом/□.

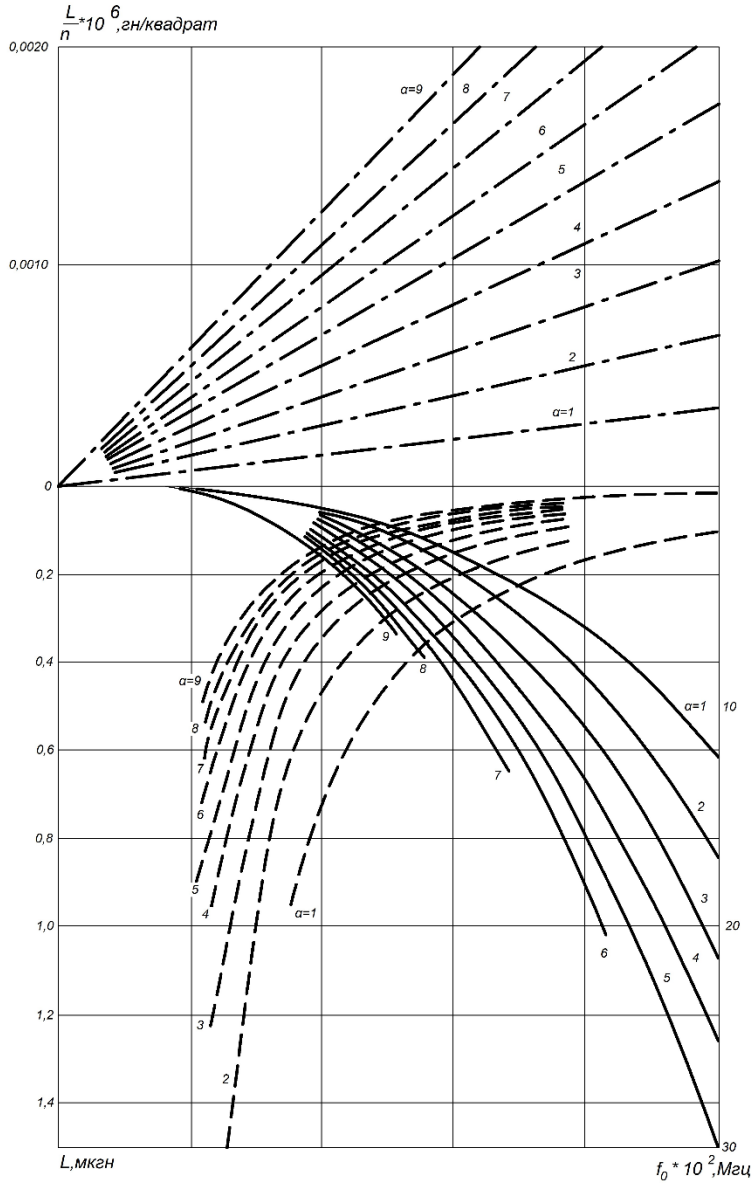


Рисунок 3.2 –Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра η=*L*/*n* (штрих-пунктирные) квадратной спирали от числа витков при различных значениях α.

Индуктивность формируется на подложке из ситалла или высокочастотной керамики и работает на частотах до нескольких сотен мегагерц, поэтому при определении добротности (3.2) не учитывается частотная зависимость потерь в подложке. Коэффициент η в первом приближении можно считать не зависимым от частоты. Частотная зависимость ρ_0 (ω) обусловлена вытеснением тока на поверхность токопровода (скин-эффект) [1]. Поперечное сечение токопровода – прямоугольник со сторонами *b* и *h*. В случае уединенного проводника плотность тока неравномерно распределена по периметру этого прямоугольника. В проводнике, расположенном в непосредственной близости с проводниками, лежащими в одной плоскости, происходит выравнивание этой неравномерности за счет действия эффекта близости [1]. Это позволяет предположить, что плотность тока равномерно распределена по ширине токопровода *b*, и рассматривать расчетную модель токопровода спирали в виде широкой плоской ленты толщиной *h*. Возможность такого упрощения подтверждена экспериментально.

Известно, что глубину проникновения поля в проводник можно вычислить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{уд}}{\omega\mu}}, \tag{3.3}$$

где δ – глубина проникновения, м;

$\rho_{уд}$ – удельное сопротивление, Ом·м.

При этом плотность тока будет затухать по толщине токопровода по закону, близкому к экспоненциальному (начало координат на поверхности токопровода, ось *x* перпендикулярна ей),

$$j = j_0 e^{-\frac{x}{\delta}}, \tag{3.4}$$

где j_0 — плотность тока на поверхности проводника.

Суммарный ток *I*, протекающий по токопроводу, будет равен:

$$I = 2\int_0^{\frac{h}{2}} j_0 e^{-\frac{x}{\delta}} dx = 2\delta j_0 (1 - e^{-\frac{h}{2\delta}}).$$

Отсюда искомое удельное сопротивление токопровода

$$\rho_0(\omega) = \frac{\rho_{уд}}{2\delta(1-e^{-\frac{h}{2\delta}})}. \quad (3.5)$$

Если подставить значение ρ_0 (ω) из (3.5) в формулу (3.2), величина добротности будет в 2-3 раза больше реальной. Это расхождение можно объяснить следующим образом. При выводе формулы (3.5) предполагалось, что материал токопровода аморфный, а его поверхность абсолютно гладкая. В действительности поверхность проводника шероховатая (величина шероховатости колеблется от 4 до 10 мкм), а структура кристаллическая (токопровод изготовляется методом электрохимического наращивания). Наличие шероховатости на поверхности токопровода можно интерпретировать увеличением длины токопровода.

В этом случае

$$\rho_0(\omega) = \frac{K(\omega)\rho_{уд}}{2\delta(1-e^{-\frac{h}{2\delta}})}. \quad (3.6)$$

где K(ω) – частотно-зависимый коэффициент, учитывающий наличие шероховатостей на поверхности.

Коэффициент K(ω) определялся экспериментально, итоговая зависимость ρ_0(ω) с учетом для случая $\rho_{уд} = 2{,}4.10^{-8}$ Ом·м приведены на рисунке 3.3 [3]. Если технология изготовления индуктивности обеспечивает токопровод с удельным сопротивлением $\rho^*_{уд}$ отличающимся от приведённого значения, необходимо значения по оси абсцисс и ординат (рисунок 3.3) умножить на коэффициент $m = \rho_{уд}/\rho^*_{уд}$ и $1/m$, соответственно.

Тонкопленочная катушка индуктивности соединяется с микросхемой проводниками, диаметр которых не более 0,2 мм; в противном случае может произойти отслоение токопровода от подложки. Общая длина подводящих проводников приблизительно равна 1 см. Зависимость сопротивления подводящих проводников от частоты для различных значений диаметров приведена в [4]. Расчеты показали, что с учетом этого сопротивления значение добротности уменьшается на 30% в зависимости от номинала индуктивности.

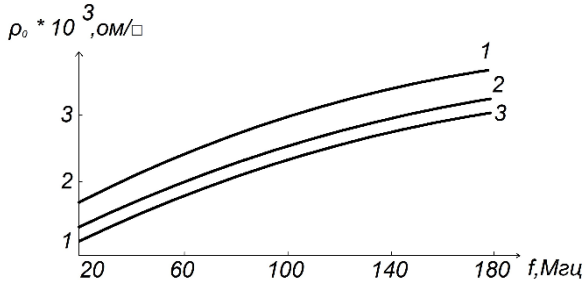


Рисунок 3.3 – Зависимость удельного поверхностного сопротивления токопровода от частоты и толщины. *h*=20; 30; 40 мкм (кривые 1-3).

Собственную резонансную частоту спиральной индуктивности достаточно точно можно определить, заменив спираль эквивалентной длинной линией, длина которой l должна равняться длине токопровода спирали. Резонанс возникает на частоте, на которой длина линии равна четверти длины электрической волны, а именно

$$f_0 = \frac{1}{4}\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\frac{1}{l}, \qquad (3.7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость подложки; f_0 – собственная резонансная частота спирали, Гц; $c = 3\cdot10^8$ м/с.

4 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов

Порядок расчета по серии номограмм зависит от требований, предъявляемых к топологии. Наиболее часто топологию индуктивности рассчитывают:

– по заданной величине индуктивности и рабочей частоте с максимально возможной величиной добротности;

– по заданному номиналу индуктивности и рабочей частоте на минимально возможной площади;

– по заданным величинам индуктивности, добротности и рабочей частоты.

Для дальнейшего расчёта и программирования нам необходимо перевести номограммы в виде таблиц 4.1-4.7. Эти таблицы в дальнейшем внесём программу для автоматизации расчётов.

Таблица 4.1 – Таблица значений зависимости L/p Гн/квадрат, от числа витков N при различных α по данным рисунка 3.1.

N	α =1	α =2	α =3	α =4	α =5	α =6	α =7	α =8	α =9
-	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат
0	0.00000				-	-	-	-	0.00000
1	0.000025				0.000115	0.000135	0.00015	0.000165	0.000195
2	0.00005	0.00008	0.00013	0.00017	0.00022	0.000255	0.0003	0.000335	0.00037
3	0.00007	0.000125	0.000295	0.00025	0.00033	0.000385	0.00045	0.0005	0.00056
4	0.000095	0.000175	0.00026	0.00033	0.000425	0.0005	0.000585	0.00066	0.00073
5	0.00012	0.000215	0.0003 2	0.000415	0.000528	0.00062	0.00073	0.00082	0.00091
6	0.00015	0.00026	0.00039	0.0005	0.000645	0.000745	0.00088	0.00099	0.001095
7	0.00017	0.0003	0.00045	0.00059	0.00075	0.000865	0.00102	0.00115	0.001265
8	0.000196	0.00035	0.000515	0.00066	0.00085	0.000985	0.00117	0.001325	0.001445
9	0.00022	0.00038	0.000575	0.00075	0.00096	0.001112	0.00131	0.00148	0.001625
10	0.00024	0.00043	0.00065	0.00082	0.00106	0.001225	0.00145	0.001645	0.00185
11	0.00026	0.00046	0.000715	0.000915	0.00117	0.00135	0.0016	0.0018	0.001985
12	0.00028	0.000515	0.00077	0.000995	0.001265	0.001465	0.00175	0.00198	-
13	0.00032	0.000555	0.000835	0.00108	0.00138	0.00159	0.0020	-	-
14	0.00034	0.00059	0.00091	0.00116	0.001475	0.001725	-	-	-
15	0.00036	0.00062	0.00097	0.00124	0.001585	0.00183	-	-	-

Таблица 4.2 – Таблица значений индуктивности *L* мкГн в зависимости от числа витков *N* для различных α по данным рисунка 3.1.

N	α=1	α=2	α=3	α=4	α=5	α=6	α=7	α=8	α=9
-	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн
0	0.0	-	-	-	-				0.0
1	0.002	-	-	-	-				0.002
2	0.006	-	-	-	-				0.006
3	0.011	-	-	-	-				0.015

Продолжение таблицы 4.2

4	0.02	-	-	-	-				0.04
5	0.035	-	-	-	-				0.1
6	0.06	0.072	0.089	0.098	0.1	0.138	0.155	0.171	0.17
7	0.092	0.111	0.14	0.16	0.19	0.212	0.25	0.272	0.292
8	0.135	0.165	0.206	0.246	0.29	0.33	0.385	0.421	0.445
9	0.191	0.231	0.299	0.357	0.43	0.49	0.561	0.605	
10	0.263	0.323	0.414	0.496	0.584	0.69	0.79		
11	0.342	0.426	0.546	0.653	0.769	0.9			
12	0.436	0.547	0.696	0.837	0.988	1.17			
13	0.541	0.685	0.884	1.043	1.238				
14	0.656	0.839	1.097	1.282	-				
15	0.77	1	1.33	1.32	-				

Таблица 4.3 – Таблица значений собственной резонансной частоты $f_0 \cdot 10^2$ МГц в зависимости от числа витков N для различных α по данным рисунка 3.1.

N	α=1	α=2	α=3	α=4	α=5	α=6	α=7	α=8	α=9
-	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц
3	-	-	20.375	16.6	13.5	11.08	9.6	5.35	7.5
4	-	18.06	12.15	9.6	8	6.88	5.75	5.05	4.4
5	-	9.9	7.5	6.02	5	4.30	3.63	3.25	3
6	10.7	6.7	5.13	4.18	3.370	2.875	2.5	2.30	2.5
7	7.7	5.13	3.85	3.125	2.49	2.132	1.88	1.70	1.6
8	5.88	3.9	3	2.4	1.88	1.63	1.42	1.30	1.20
9	4.7	3.20	2.4	1.92	1.6	1.37	1.125	0.95	0.95
10	3.9	2.7	2	1.65	1.3	1.125	0.875	0.80	0.78
11	3.38	2.35	1.68	1.35	1.12	0.9	0.85	0.65	0.625
12	2.95	2.05	-	-	-	-	-	-	0.5
13	2.55	1.7	-	-	-	-	-	-	0.35
14	2.1	1.4	-	-	-	-	-	-	0.20
15	1.55	1.15	-	-	-	-	-	-	0.15

Таблица 4.4 – Таблица значений зависимости L/p Гн/квадрат, от числа витков N при различных α по данным рисунка 3.2.

N	α =1	α =2	α =3	α =4	α =5	α =6	α =7	α =8	α =9
-	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат
0	0.0000	-	-	-	-	-	-	-	0.00000
1	0.000014	-	-	-	-	-	-	0.000175	0.000215
2	0.000045	0.00009	0.00013	0.000175	0.000225	0.000265	0.000315	0.000365	0.00042
3	0.000065	0.00014	0.0002	0.00027	0.000345	0.0004	0.000475	0.00055	0.00063
4	0.000095	0.00019	0.000265	0.000365	0.00046	0.000542	0.00064	0.000735	0.00084
5	0.00012	0.000235	0.000345	0.000458	0.000575	0.00068	0.0008	0.00092	0.000105
6	0.000145	0.000275	0.000408	0.00055	0.000686	0.000825	0.000965	0.00011	0.00126
7	0.00016	0.000325	0.00047	0.000645	0.00081	0.000965	0.00113	0.00129	0.00147
8	0.000195	0.00037	0.000548	0.00074	0.00093	0.00011	0.001292	0.001475	0.001675
9	0.00021	0.000415	0.000615	0.000825	0.000104 5	0.00124	0.00146	0.001665	0.00188
10	0.00024	0.00046	0.00068	0.000925	0.001165	0.00138	0.001625	0.00185	-
11	0.00026	0.00051	0.000755	0.000102	0.00128	0.00152	0.00178	-	-
12	0.00028	0.000555	0.000825	0.001118	0.001395	0.00166	0.001953	-	-
13	0.00031	0.000595	0.00089	0.001205	0.001515	0.0018	-	-	-
14	0.00034	0.000642	0.000965	0.0013	0.00163	0.00194	-	-	-
15	0.00036	0.00068	0.000103	0.001395	0.001745	-	-	-	-

Таблица 4.5 – Таблица значений индуктивности L мкГн в зависимости от числа витков N для различных α по данным рисунка 3.2.

N	α=1	α=2	α=3	α=4	α=5	α=6	α=7	α=8	α=9
-	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн	мкГн
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	0.0
1	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.002
2	0.003	-	-	-	-	-	-	-	0.006
3	0.005	-	-	-	-	-	-	-	0.01
4	0.02	-	-	-	-	-	-	-	0.045
5	0.038	-	-	-	-	-	-	-	0.095
6	0.05	0.065	0.07	0.085	0.1	0.125	0.135	0.15	0.17
7	0.075	0.09	0.115	0.135	0.165	0.195	0.21	0.24	0.26
8	0.11	0.135	0.18	0.208	0.24	0.29	0.315	0.36	-
9	0.155	0.19	0.25	0.3	0.35	0.4	0.458	-	-
10	0.2	0.26	0.345	0.41	0.475	0.54	0.615	-	-
11	0.266	0.34	0.44	0.535	0.62	0.705	-	-	-
12	0.325	0.438	0.56	0.68	0.8	0.925	-	-	-
13	0.405	0.552	0.695	0.855	1.015	-	-	-	-
14	0.505	0.685	0.875	1.045	1.24	-	-	-	-
15	0.61	0.845	1.07	1.265	1.48	-	-	-	-

Таблица 4.6 – Таблица значений собственной резонансной частоты $f_0 \cdot 10^2$ МГц в зависимости от числа витков N для различных α по данным рисунка 3.2.

N	α=1	α=2	α=3	α=4	α=5	α=6	α=7	α=8	α=9
-	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц	МГц
3	-	-	-	-	18.27	-	-	-	-
4	-	27.5	19.12	14.56	11.425	9.675	8.35	7.425	6.475
5	-	14.0625	10.72	8.34	6.9	5.75	5.02	4.575	4.113
6	14.425	9.27	6.94	5.625	4.575	3.888	3.375	3.0625	2.75
7	10.35	6.75	5	4.15	3.32	2.825	2.4	2.175	1.888
8	7.775	5.2	3.875	3.16	2.5	2.125	1.9	1.65	1.39
9	6.15	4.14	3.04	2.5	2	1.7	1.525	1.275	1.125
10	4.95	3.3625	2.46	1.98	1.625	1.4	1.175	0.975	0.875
11	4.05	2.77	2.05	1.65	1.3625	1.175	1	0.84	0.7
12	3.35	-	-	-	-	-	-	-	0.55
13	2.775	-	-	-	-	-	-	-	0.425
14	2.4	-	-	-	-	-	-	-	0.375
15	2.1	-	-	-	-	-	-	-	0.325

Таблица 4.7 – Таблица значений зависимости удельного поверхностного сопротивления токопровода от частоты и толщины. *h*=20; 30; 40 мкм.

f, Мгц	*h*=20 (1 кривая)	*h*=30 (2 кривая)	*h*=40 (3 кривая)
-	Гн/квадрат	Гн/квадрат	Гн/квадрат
20	1.7	1.38	1.2
30	1.83	1.55	1.36
40	2.055	1.7	1.503
50	2.2	1.8625	1.6625
60	2.37	1.95	1.8
70	2.5	2.125	1.9
80	2.625	2.23	2.05
90	2.73	2.3625	2.175
100	2.95	2.4	2.29
110	3.07	2.50625	2.32
120	3.1875	2.69	2.49
130	3.26	2.77	2.575
140	3.375	2.9	2.668
150	3.44	3.04	2.74
160	3.502	3.125	2.875
170	3.5063	3.2	3
180	3.625	3.24	3.04

4.1 Расчет топологии индуктивности с максимально возможной добротностью

Известно, что для одного и того же номинала индуктивности длина токопровода круглой спирали меньше, чем квадратной, т. е. у круглой спирали меньше активное сопротивление и выше добротность. Поэтому при решении данной задачи лучше выбирать круглую форму спирали.

Максимальная добротность достигается при максимальном значении параметра $\alpha=b/p$, так как при больших α заданная величина индуктивности реализуется с меньшим числом витков, т. е. с меньшей длиной токопровода.

Как отмечалось выше, все номограммы, приведенные на рисунках 3.1 и 3.2 построены для внутреннего диаметра спирали, равного минимально возможной ширине контактной площадки (*d*=500 мкм). Однако при увеличении *d* от нуля до некоторого значения добротность катушки возрастает на 15-20%. Имеется оптимальное отношение внутреннего и внешнего диаметров спирали, при которых добротность максимальна. Для круглой катушки

$$(\frac{d}{D})_{\text{опт}} = 0{,}4, \qquad (4.1)$$

для квадратной спирали

$$(\frac{d}{D})_{\text{опт}} = 0{,}362, \qquad (4.2)$$

Но при увеличении внутреннего диаметра (выборке внутренних витков) до величины, удовлетворяющей соотношениям (4.1-4.2), индуктивность спирали уменьшается на 14%. В данном случае топологию рассчитывают в следующей последовательности:

– заданное значение индуктивности увеличивают на 14%;

– по номограммам рисунка 3.1 определяют число витков спирали, соответствующее полученному ранее значению индуктивности для максимального значения α;

– определяют величину внешнего диаметра спирали по формуле

$$D = 0{,}02\ (1+\alpha)\ N\ (\text{см}); \qquad (4.3)$$

– из уравнения (4.1) определяют внутренний диаметр спирали *d*;

– по полученным α и *N* (рисунок 3.1) определяют значение параметра η;

– по заданной рабочей частоте определяют (рисунок 3.3) значение удельного поверхностного сопротивления;

– по формуле (3.2) рассчитывается добротность спирали;

– расчетное значение добротности увеличивается на 15%;

– по номограммам, приведенным на рисунке 3.1, определяют собственную резонансную частоту индуктивности.

Часто в числе задаваемых параметров присутствует ограничение по занимаемой площади. В этом случае значение параметра α выбирается максимальным из условия удовлетворения ограничений по занимаемой площади.

Пример расчёта:

Для количественного примера расчётов возьмём индуктивность *L*=0.4 мкГн, *f*=50Мгц, h = 30 мкм.

1) заданное значение индуктивности увеличиваем на 14%;

L= 0.4+0.056 = 0.456 мкГн

2) по номограммам из рисунка 3.1 определяем число витков спирали, соответствующее полученному ранее значению индуктивности для максимального значения α;

α=9, N= 8

3) определяем величину внешнего диаметра спирали по формуле (4.3):

D= 0,02*(1+9)*8= 1.6 см;

4) из уравнения (4.1) определяем внутренний диаметр спирали d;

$d = 0.4 \cdot D = 0.4 \cdot 1.6 = 0.64$ см,

5) по полученным α и N по рисунку 3.1 определяют значение параметра η;

η=0.001445

6) по заданной рабочей частоте определяем по рисунку 3.3 значение удельного поверхностного сопротивления;

$\rho_0 = 1.86 \cdot 10^3$ Ом/□

7) по формуле (3.2) рассчитывается добротность спирали;

$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 10^6 = 3.14 \cdot 10^8$

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)} = \frac{0.001445 \cdot 3.14 \cdot 10^8}{1.86 \cdot 10^3} = 243.737$$

8) расчетное значение добротности увеличивается на 15%;

Q = 280.298

9) по номограммам, приведенным на рисунке 3.1, определяют собственную резонансную частоту индуктивности.

$f_0 = 1.2 \cdot 10^2$ МГц

4.2 Расчет топологии индуктивности на минимальной занимаемой площади

Минимально занимаемую площадь получают при квадратной форме спирали, минимальном α и внутреннем диаметре, равном нулю.

В связи с этим расчет производится в следующей последовательности:

– по номограммам из рисунка 3.2 для заданного значения индуктивности и минимального α определяют число витков спирали и значение η;

– по заданной рабочей частоте определяют из рисунка 3.3 значение удельного сопротивления;

– рассчитывают добротность индуктивности;

– определяют частоту собственного резонанса спирали из рисунка 3.2.

Пример расчёта:

Для количественного примера расчётов возьмём индуктивность L=0.4 мкГн, f=100Мгц, h = 40 мкм.

1) по номограммам из рисунка 3.2 для заданного значения индуктивности и минимального α определяем число витков спирали и значение η;

α=1, N= 12, η=0.00028

2) по заданной рабочей частоте определяем из рисунка 3.3 значение удельного сопротивления;

ρ_0=2.29·10^3 Ом/□

3) рассчитываем добротность индуктивности;

ω=2πf= 2·3.14·100·10^6=6.28·10^8

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)} = \frac{0.00028 \cdot 6.28 \cdot 10^8}{2.29 \cdot 10^3} = 76.825$$

4) определяем частоту собственного резонанса спирали из рисунка 3.2.

f_0=2.950 ·10^2 Мгц

4.3. Расчет топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности

Производится в следующей последовательности:

– определяют значение удельного сопротивления из рисунка 3.3;

– заданное значение добротности уменьшают на 15%;

– по формуле (3.2) рассчитывают значение параметра η по ρ_0 и Q;

– полученное значение η откладывают по оси ординат на рисунке 3.1 и проводят горизонтальную линию;

– увеличивают заданное значение индуктивности на 14% и откладывают его на оси ординат рисунка 3.1; проводят горизонтальную линию;

– передвигая линейку параллельно оси ординат, определяют число витков спирали. Пересечение линейки с проведенными линиями должно при этом находиться на кривых с одинаковым значением параметра α. Если такое пересечение отсутствует, значит заданная индуктивность не может быть реализована с заданной добротностью;

– определяют значения внутреннего и внешнего диаметров;

– из рисунка 3.1 находят частоту собственного резонанса индуктивности.

Пример расчёта:

Для количественного примера расчётов возьмём индуктивность L=0.05 мкГн, f=1000 Мгц, h = 20 мкм, Q=300.

1) определяют значение удельного сопротивления из рисунка 3.3;
   $\rho_0=3.625\cdot10^3$ Ом/□
2) заданное значение добротности уменьшают на 15%;
   Q=300-40=260
3) по формуле (3.2) рассчитывают значение параметра η по ρ_0 и Q;

$\omega=2\pi f= 2\cdot3.14\cdot1000\cdot10^6=6.28\cdot10^9$

$$\eta = \frac{Q\rho_0(\omega)}{\omega} = \frac{260\cdot3.625\cdot10^3}{6.28\cdot10^9} = 0.00015$$

4) полученное значение η откладываем по оси ординат на рисунке 3.1 и проводим горизонтальную линию;

5) увеличиваем заданное значение индуктивности на 14% L=0.057 мкГн и откладывают его на оси ординат рисунка 3.1; проводят горизонтальную линию;

6) передвигая линейку параллельно оси ординат, определяют число витков спирали. Пересечение линейки с проведенными линиями должно при этом находиться на кривых с одинаковым значением параметра α. Если такое пересечение отсутствует, значит заданная индуктивность не может быть реализована с заданной добротностью;

α=1, N=6

7) определяют значения внутреннего и внешнего диаметров;

определяем величину внешнего диаметра спирали по формуле (4.3):

$$D= 0{,}02*(1+1)*6= 0.24 \text{ см};$$

из уравнения (4.1) определяем внутренний диаметр спирали d;

$$d = 0.4 \cdot D = 0.4 \cdot 0.24 = 0.096 \text{ см},$$

8) из рисунка 3.1 находят частоту собственного резонанса индуктивности.

f_0=10.7 ·10^2 Мгц

Заключение

Для упрощения составления и использования номограмм были зафиксированы некоторые конструктивные параметры спиралей, а именно: расстояния между витками p и внутренний диаметр d (выбраны исходя из технологических ограничений и соответственно равны 100 и 500 мкм). В действительности, проведя простые расчеты, можно распространить эту методику для произвольных значений p и d.

Можно показать, что изменение геометрических размеров спирали в K_l раз изменяет индуктивность системы в K_e раз. Поясним это на примере. Пусть p =50 мкм, d =250, т.е. K_e = 1/2. Для расчета индуктивности с указанными параметрами необходимо значения на осях L/n и L (на рисунках 3.1-3.2) уменьшить в 2 раза. В остальном порядок расчета полностью совпадает с порядком, приведенным выше.

При проведении расчетов можно с достаточной для инженерной практики точностью полагать d =500 мкм, поскольку при изменении d от нуля до $d_{\text{опт}}$, значение индуктивности изменяется на 14%.

Используя формулу (3.7), можно показать, что собственные резонансные частоты f_0 указанных выше индуктивностей будут подчиняться соотношению $f_{01} = \frac{1}{K_e} f_{02}$.

Это означает, что при изменении геометрических размеров согласно в K_e раз собственная резонансная частота индуктивности изменяется в 1/ K_e раз. В рассмотренном выше примере для правильного определения резонансной частоты необходимо значения по оси f_0 увеличить в 2 раза. Таким образом, можно достаточно просто рассчитывать спиральные индуктивности с произвольным расстоянием между витками.

5 Обзор программного обеспечения

5.1 Общие сведения и функциональное назначение

В данном разделе приведено описание программы «*ThinFilmCapacitor.exe*», предназначенной для расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора с дискретной подгонкой. Для функционирования данной программы необходима предустановленная программная платформа *.NET Framework* версии 6.0.

Исходным языком программы «*ThinFilmCapacitor.exe*» является *CSharp*. Среда разработки и компилятор - *Microsoft Visual Studio*.

Программа выполняет две основные функции.

Первой функцией программы является расчёт параметров конденсатора исходя из заданных параметров, который вводит пользователь. К таким параметрам относятся: материал (часто используемые материала внесены в программу заранее) и исходные параметры конденсатора.

Второй функцией программы является расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов. Есть 3 метода расчёта: максимальная добротность, минимальная занимая площадь и по заданной добротности. Из заданных параметров для первых двух способов L, f, h. В третьем способе к имеющимся параметрам добавляется добротность.

В программе была специально создана база данных, в которой хранятся наименования и параметры материалов, пользователь всегда может при необходимости добавить свой собственный материал, даже после перезагрузки программы новый материал останется в таблице. А также без проблем удалить любой выбранный материал.

Так же была создана папка «*source*», в которой находятся готовые эскизы тонкоплёночных конденсаторов с дискретной подгонкой. Всего таких изображений – десять. Так как, обычно подобные конденсаторы имеют от одного до десяти подгоночных секций.

5.2 Функциональные возможности и интерфейс

При запуске программы (рисунок 5.1) появляется главное меню, где у пользователя есть выбор к какой программе обратиться.

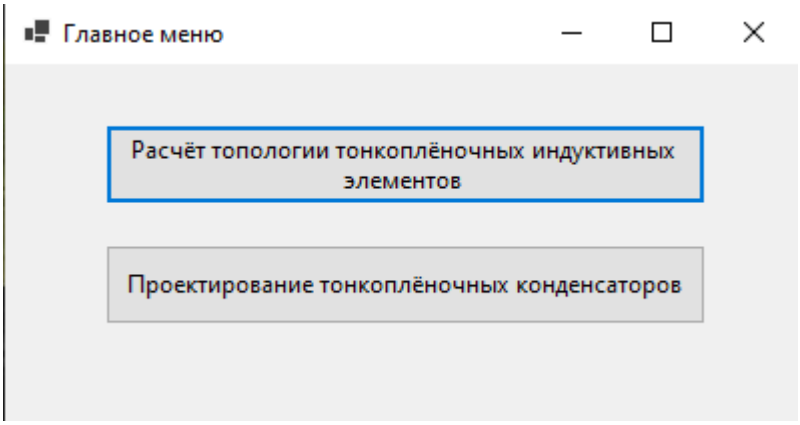


Рисунок 5.1 – Главное меню

Далее при нажатии на " Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов". Открывается другое меню (рисунок 5.2), в котором мы можем выбрать какой алгоритм расчёта нам необходим. При нажатии на *Combobox,* открывается выбор алгоритма (рисунок 5.3).

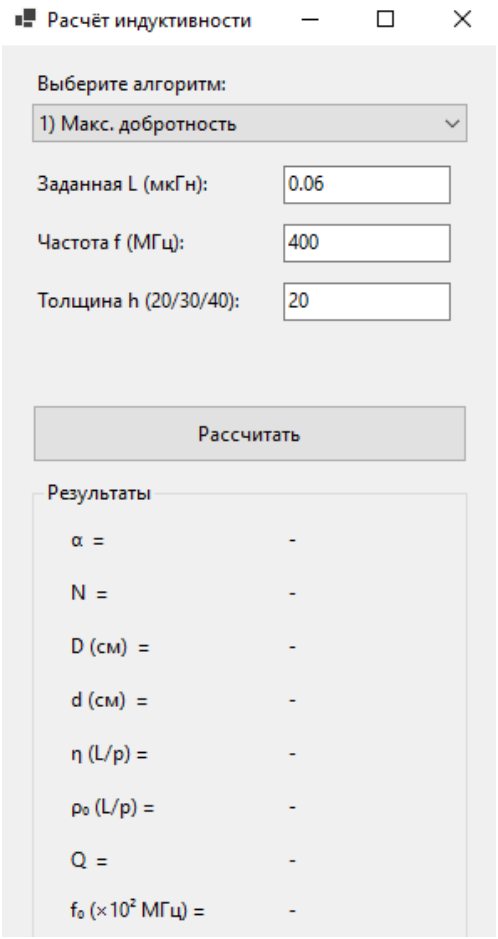


Рисунок 5.2 – Расчёт индуктивности (1 алгоритм)

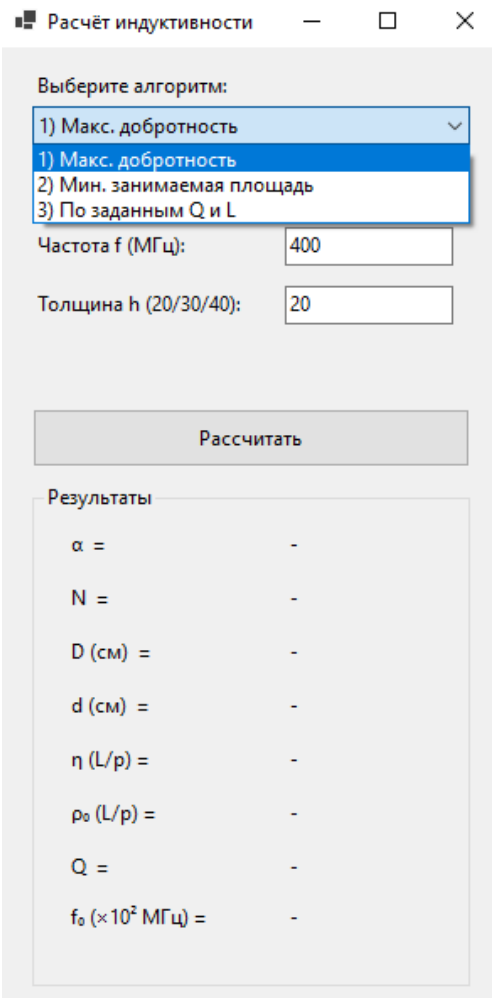


Рисунок 5.3 – Выбор необходимого алгоритма

Теперь нажатие мыши на нужном алгоритме переключает меню, на рисунках 5.4 и 5.5 показывает разницу между окнами.

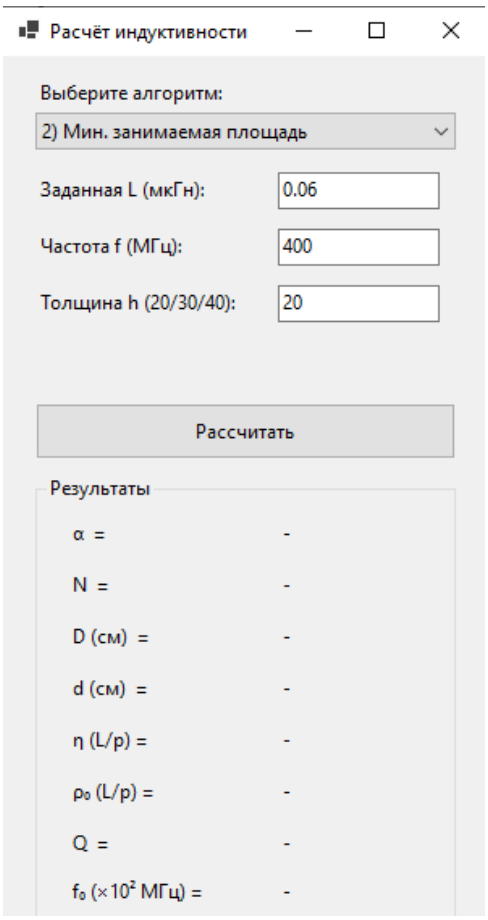


Рисунок 5.4 – Расчёт индуктивности (2 алгоритм)

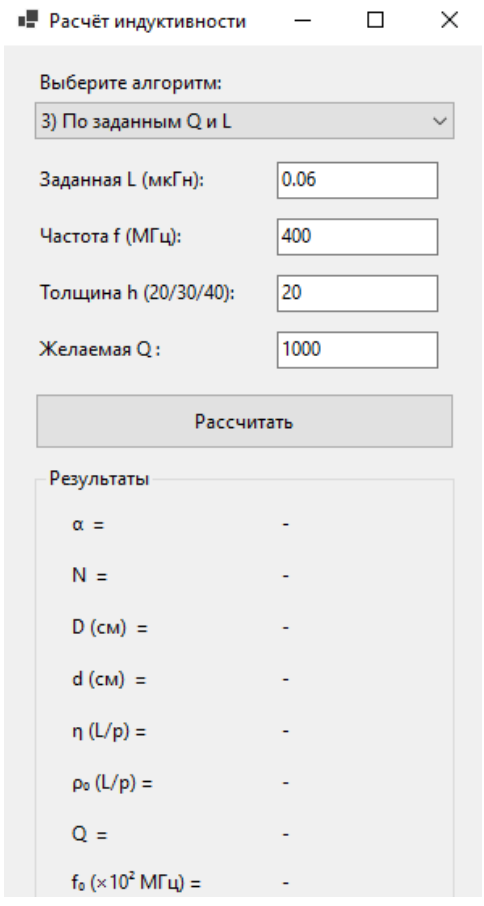


Рисунок 5.5 – Расчёт индуктивности (3 алгоритм)

Теперь пользователь может вводить необходимые параметры, при этом ему не нужно задумываться как правильно писать цифры, ведь программа работает при "0.2" и "0,2" одинаково без ошибок. Как только он ввёл параметры, необходимо нажать кнопку рассчитать. После нажатия, результаты расчётов моментально появляются в окне "Результаты". На рисунке 5.6 показаны примеры расчётов. В остальных алгоритмах, методика расчётов происходит так же нажатием кнопки "Рассчитать".

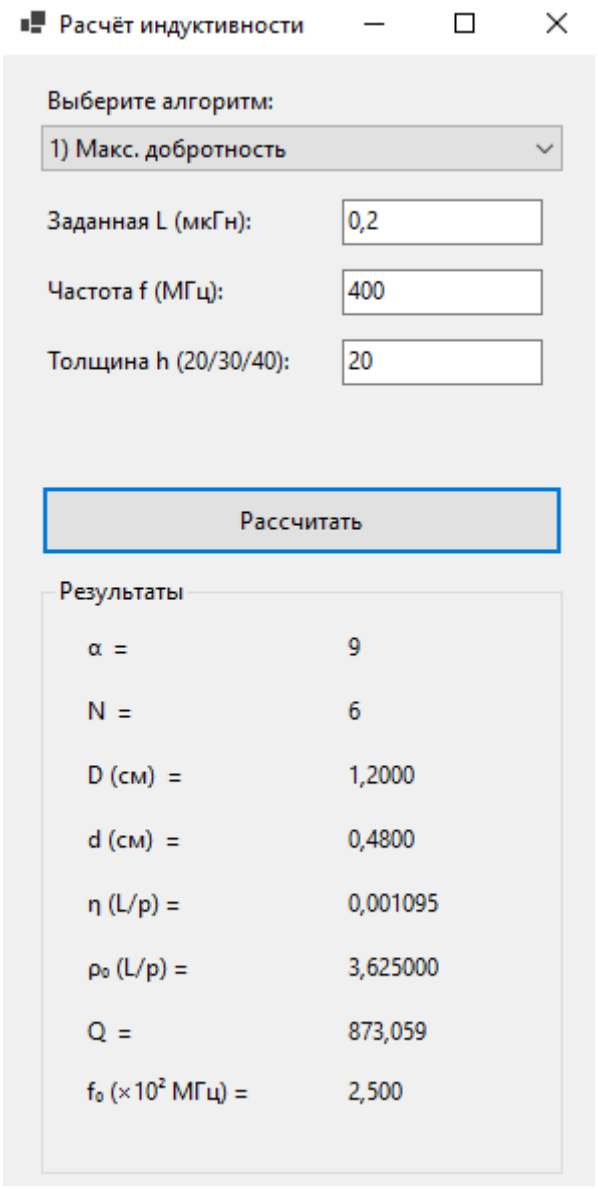


Рисунок 5.6 – Готовые результаты

Возвращаемся в главное меню (рисунок 5.1) и нажимаем на кнопку " Проектирование тонкоплёночных конденсаторов". У нас открывается меню для расчёта конденсатора (рисунок 5.7).

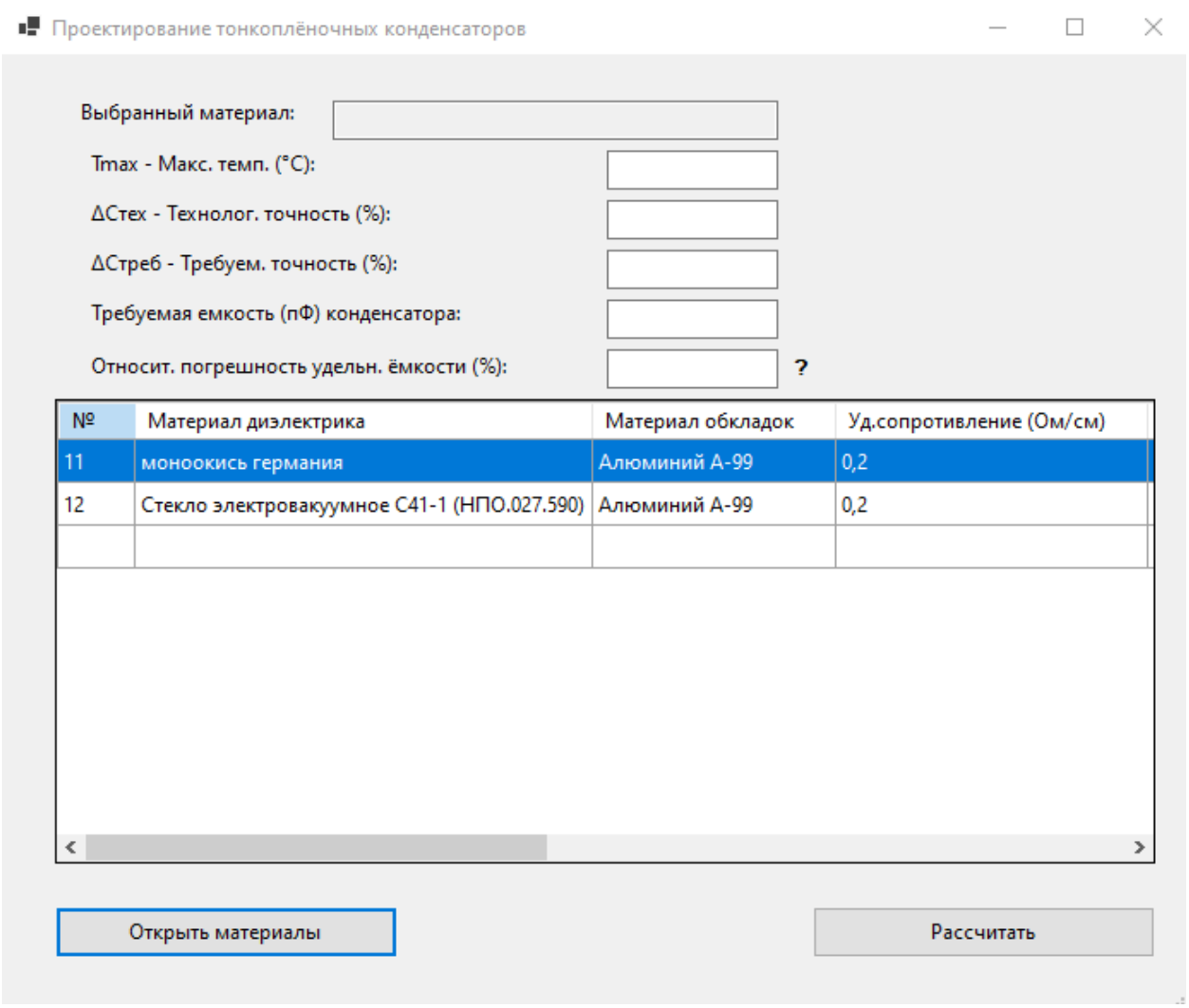


Рисунок 5.7 – Меню расчёта конденсатора

Перед нами открывается окно, в котором находятся несколько *textbox*-ов, куда можно ввести параметры необходимые пользователю. У каждого *textbox*-а написано какой параметр вводить, и, если навестись курсором на знак вопроса (рисунок 5.8) появится объяснение параметра, который может быть не понятен.

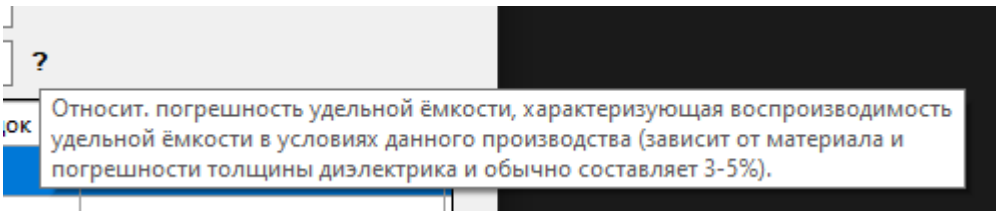


Рисунок 5.8 – Описание параметра

Для того чтобы выбрать необходимый материал, необходимо навестись курсором на нужный материал в таблице и двойным нажатием выбрать его. Когда материал будет выбран, он отобразиться в поле "Выбранный материал". На рисунке 5.9 было выбрано "Стекло электровакуумное".

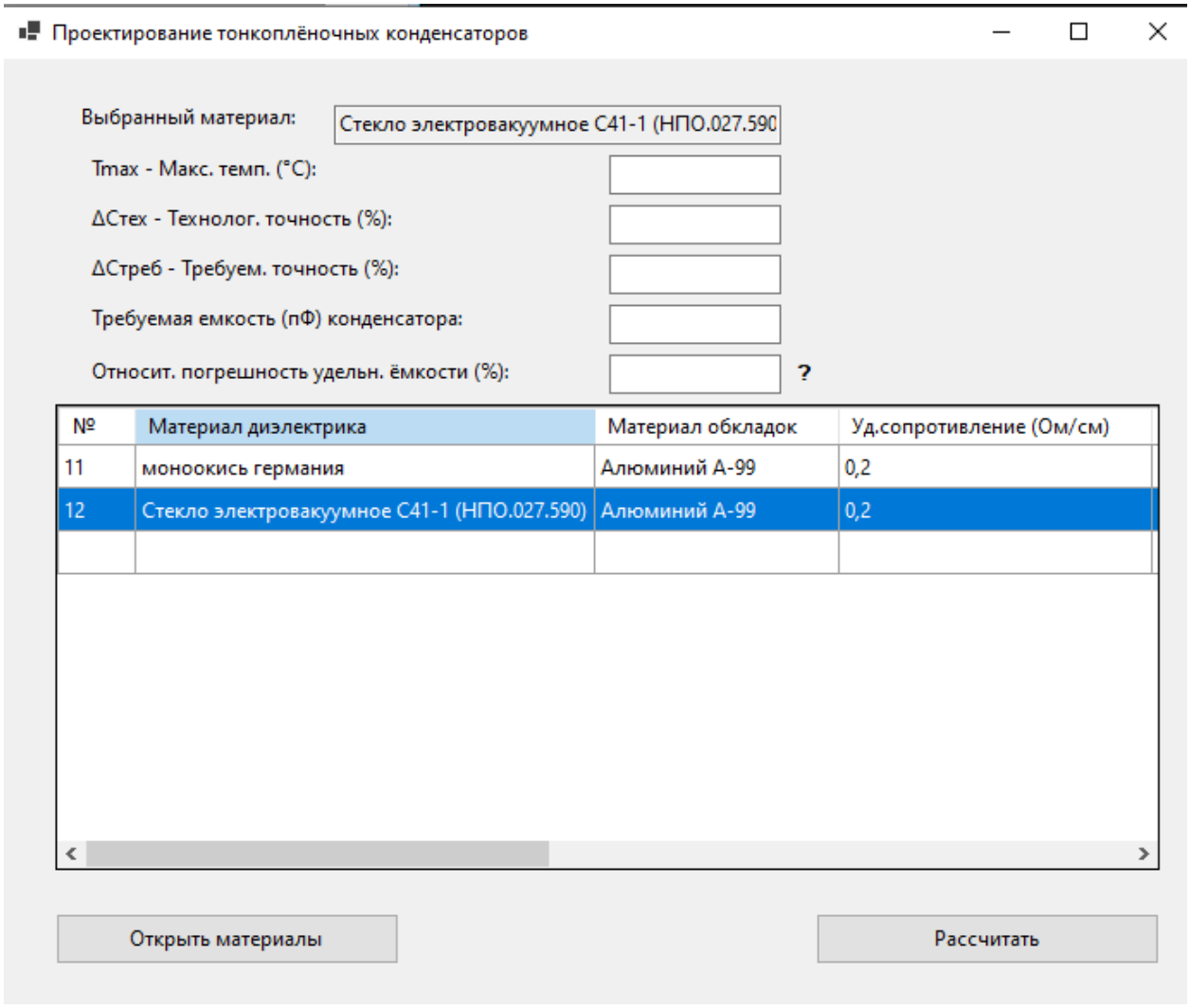


Рисунок 5.9 – Выбор материала

Если нужного материала в таблице не окажется, необходимо нажать кнопку "Открыть материалы". После чего появится окно с таблицей материалов, показанное на рисунке 5.10.

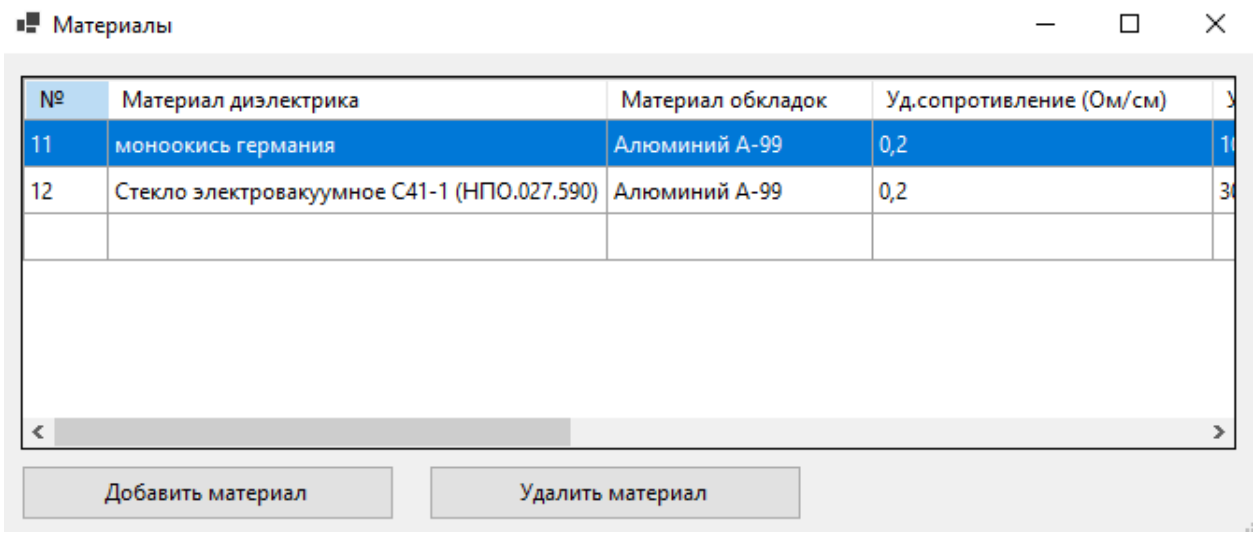


Рисунок 5.10 – Таблица материалов

В этом окне мы можем удалить не нужный материал, нажав соответствующую кнопку, после которой появится подтверждение действия, чтобы не удалить материал случайно (рисунок 5.11). Если в окне с таблицей материалов, нажать кнопку "Добавить материал". Появится новое окно, где можно добавить любой материал, с любыми параметрами. Окно это показано на рисунке 5.12.

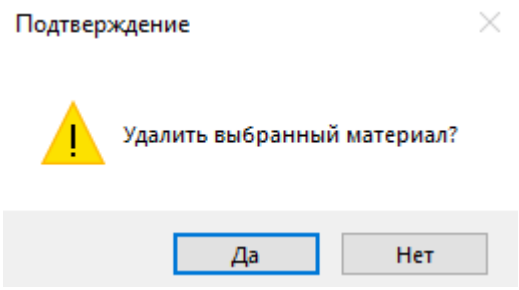


Рисунок 5.11 – Подтверждение

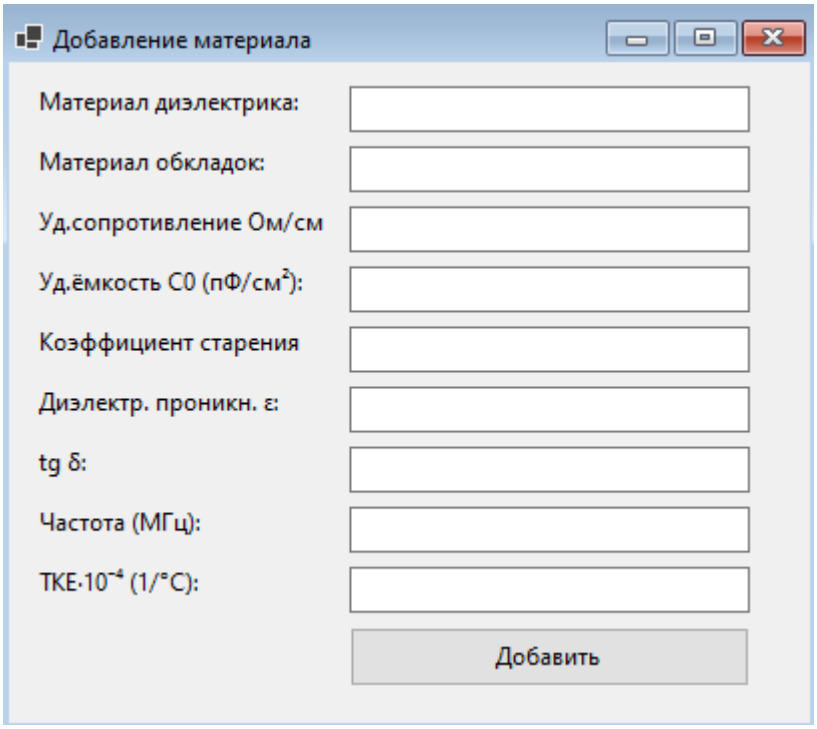


Рисунок 5.12 – Добавление нового материала

Вводим параметры материала, как показано на рисунке 5.13. После этого нажимаем кнопку "Добавить". Если все параметры введены правильно, появится уведомление о том, что материал успешно добавлен. Это уведомление показано на рисунке 5.14. После этого материал появится в таблице и станет доступным для выбора.

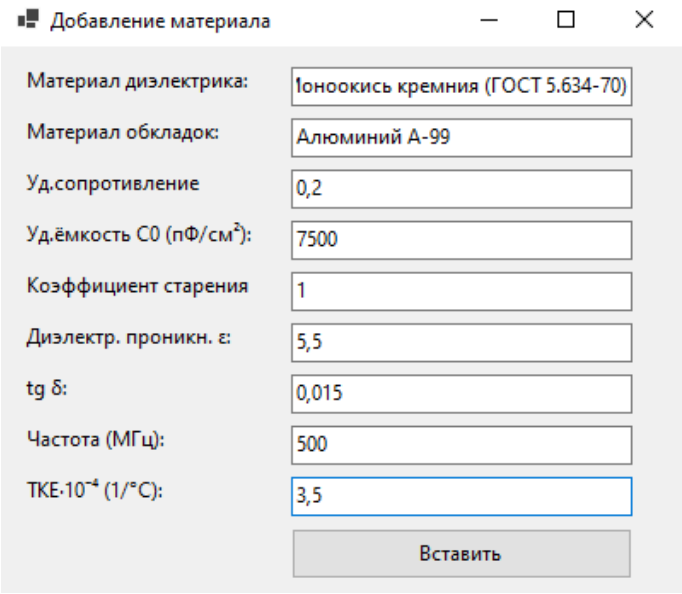


Рисунок 5.13 – Добавление нового материала, ввели параметры

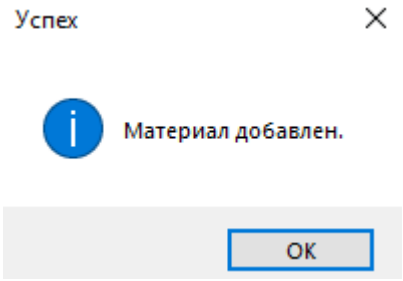


Рисунок 5.14 – Успешное добавление материала

Выберем новый материал и введем необходимые параметры конденсатора (рисунок 5.15), нажимаем кнопку "Рассчитать". Если все параметры введены верно, и программа посчитала необходимым использовать конденсатор с подгоночными секциями, вместо простого. У нас появляется новое окно (рисунок 5.16), в котором мы можем выбрать сколько у нас будет секций у конденсатора. Для того чтобы была свобода выбора и вариативность.

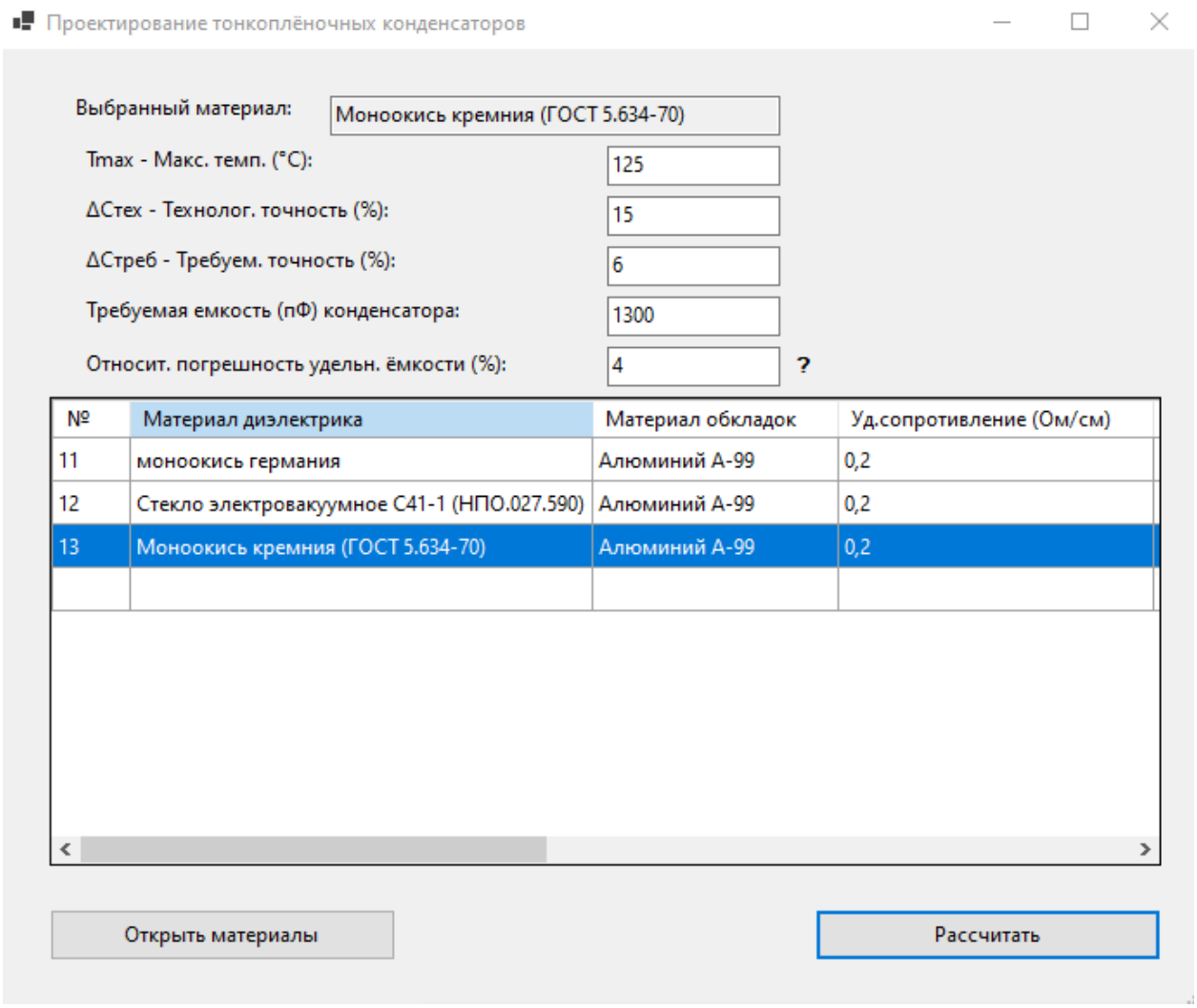


Рисунок 5.15 – Выбрали материал и ввели параметры

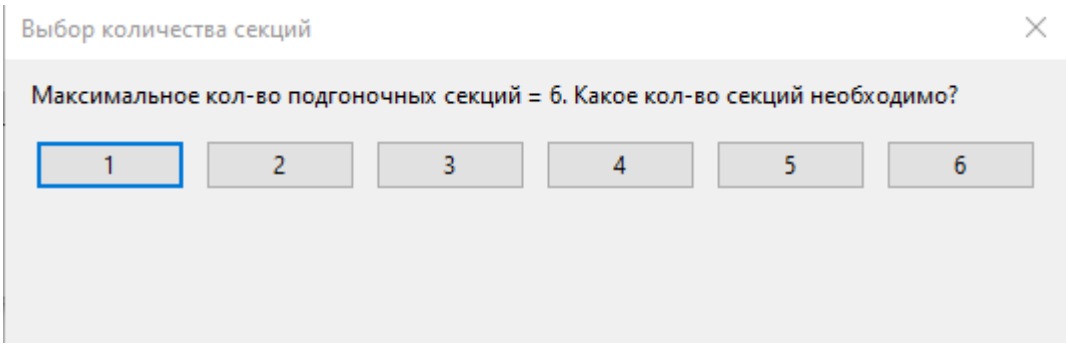


Рисунок 5.16 – Выбор количества секций

Пользователь, выбирая любое количество секций, кроме 1. Видит перед собой подтверждение выбора (рисунок 5.17). При выборе одной подгоночной секции, помимо подтверждения появляется ещё и предупреждение (5.18).

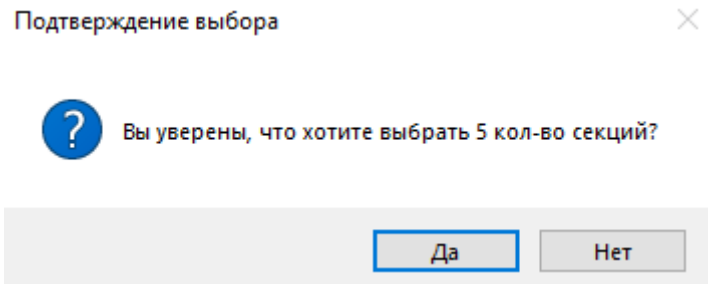


Рисунок 5.17 – Подтверждение выбора

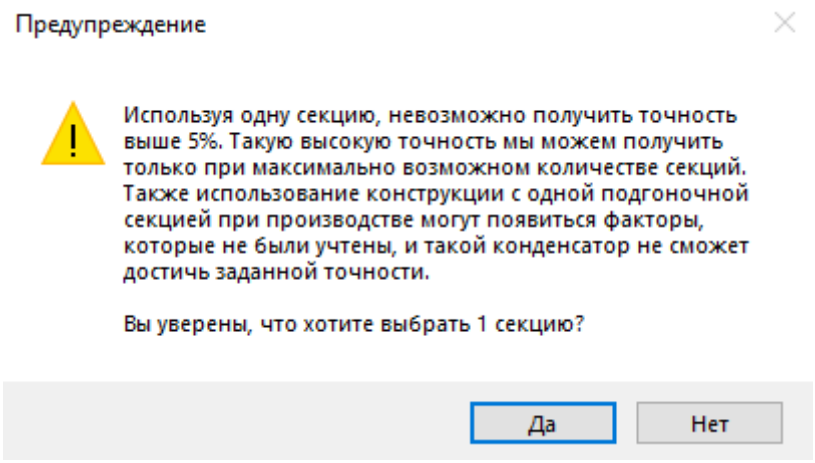


Рисунок 5.18 – Подтверждение выбора одной секции

После того как мы выбрали нужное количество секций, перед нами появляется последнее окно с результатами расчёта (рисунок 5.19). Где находятся все размеры конденсатора, количество секций, толщина диэлектрика и емкость одной секции.

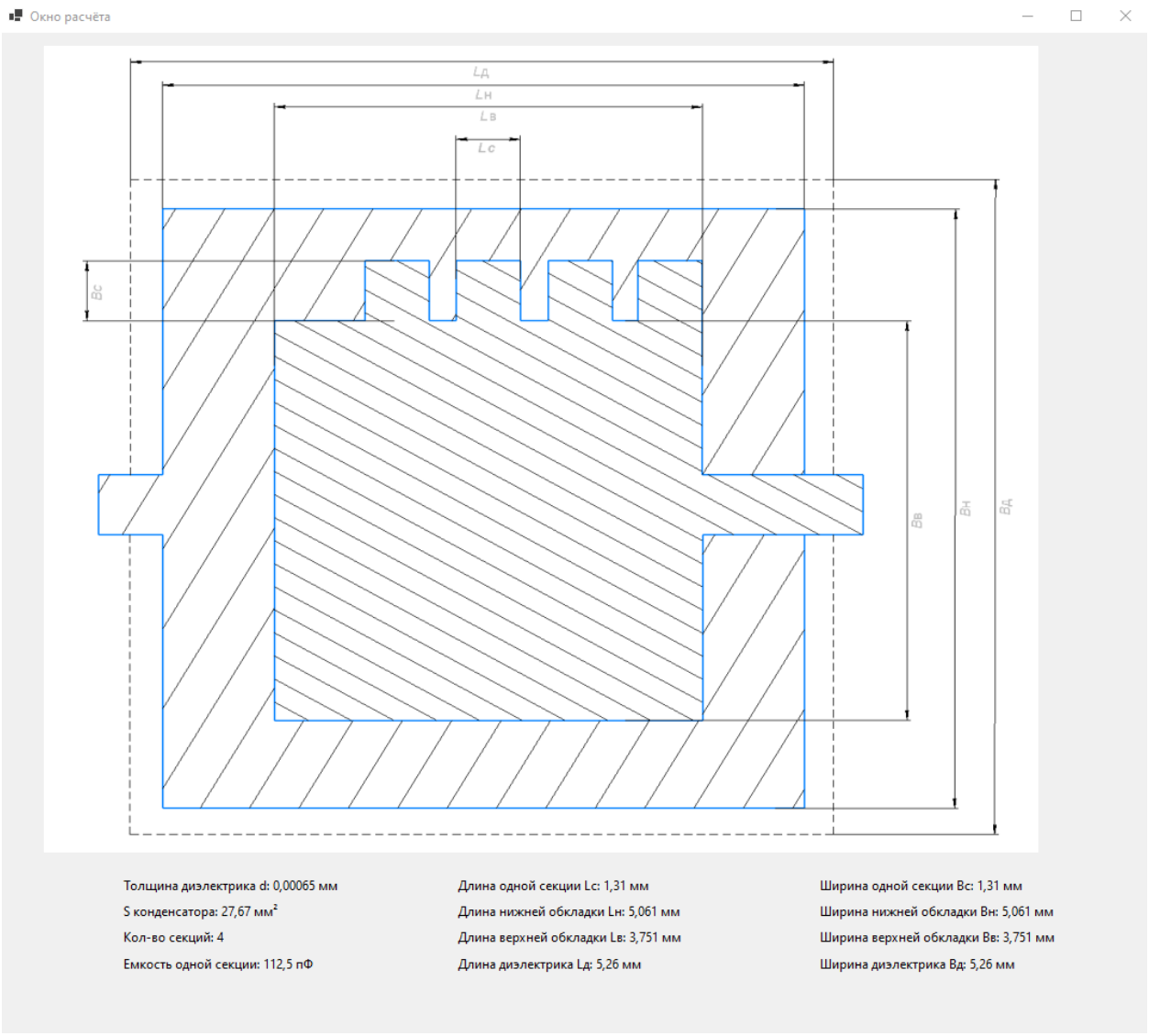


Рисунок 5.19 – Результаты расчёта

5.3 Проверка расчётов и различные уведомления

Теперь для проверки работоспособности программы, введём посчитанные вручную параметры. Для конденсатора у нас $\Delta C_{техн}$=15%, $C_{исх}$=1000 пФ, $\Delta C_{треб}$=5%, T_{max} = 125°C, γc_0 =4%, Материал диэлектрика – монооксись германия, материал обкладок – Алюминий А-99. Параметры материалов: ε = 11.5; $tg\delta_{диэл}$=0.006; $E_{пр}$=10^7 В/см; ТКЕ=$1.5 \cdot 10^{-4}$ 1/°C, C_0=100 пФ/мм^2, $\gamma c_{ст}$=0.5, ρ_S = 0.2 Ом. Все эти данные вводим в *text-box*'ы (рисунок 5.20).

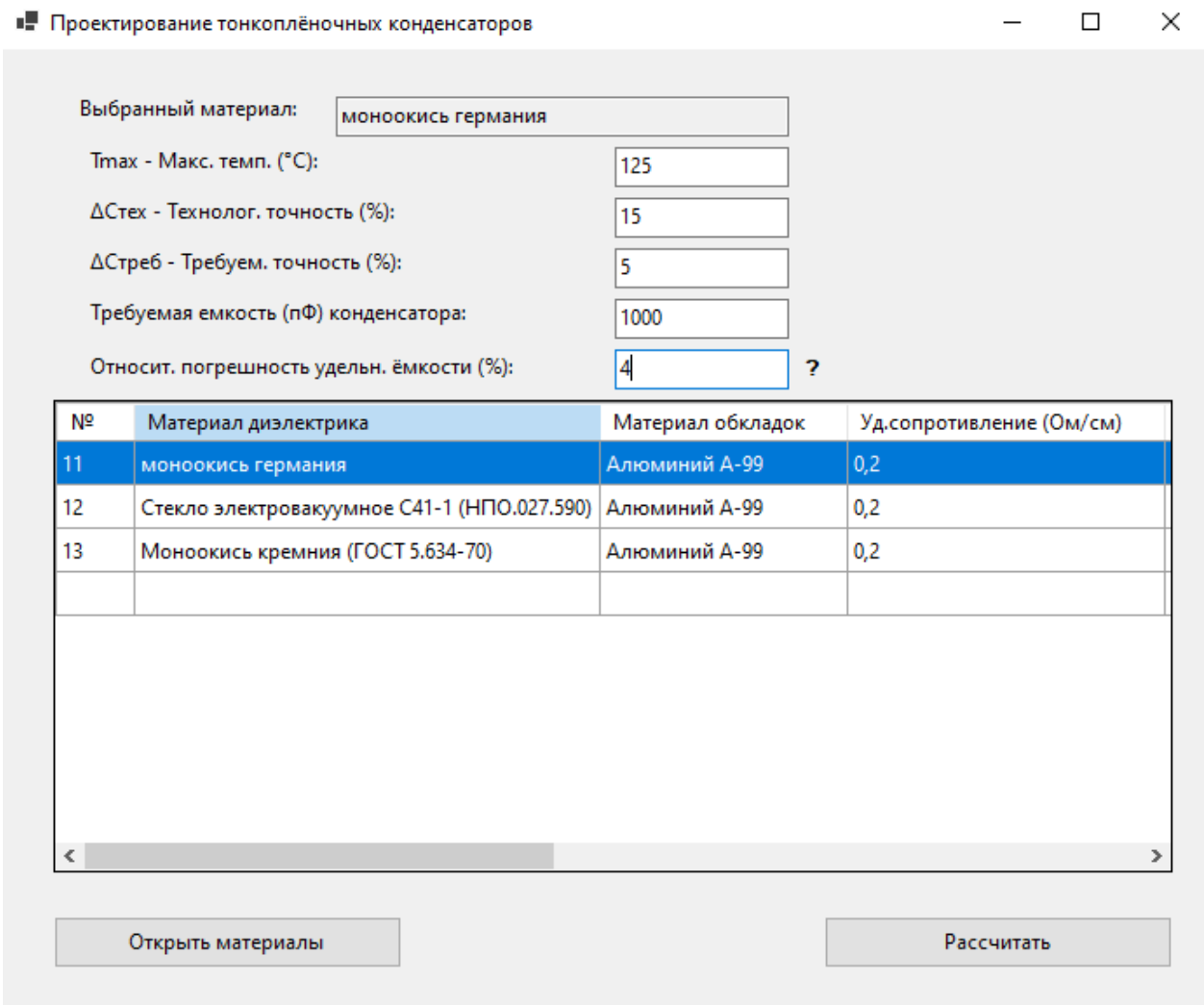


Рисунок 5.20 – Рассчитанные вручную данные

Стоит обратить внимание, что количество кнопок динамично меняются, в зависимости от максимально возможного количества секций. Если при данных на рисунке 5.15, у нас получалось как видно из рисунка 5.16, 6 максимальных секций, то при параметрах, которые мы случайно брали для расчёта вручную. У нас получилось максимально 3 секции (рисунок 5.21), как и при ручном расчёте.

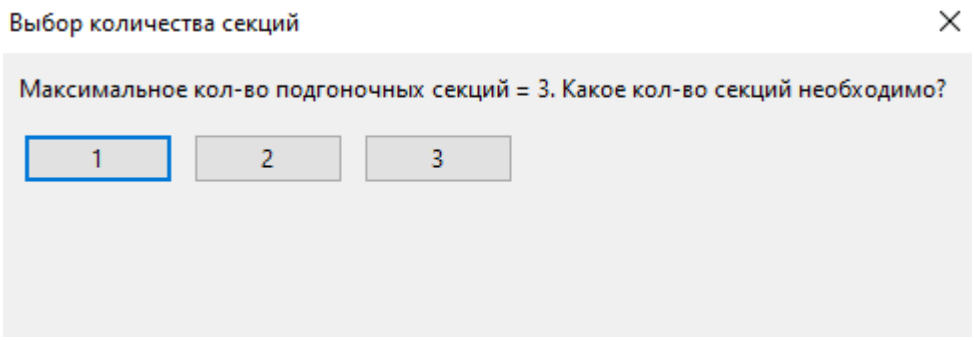


Рисунок 5.21 – Выбор количества секций

После выбора 3 секций и подтверждения выбора. Появляется финальное окно расчётов (рисунок 5.22), рассчитанные вручную данные полностью сходятся. А следовательно программа работает корректно.

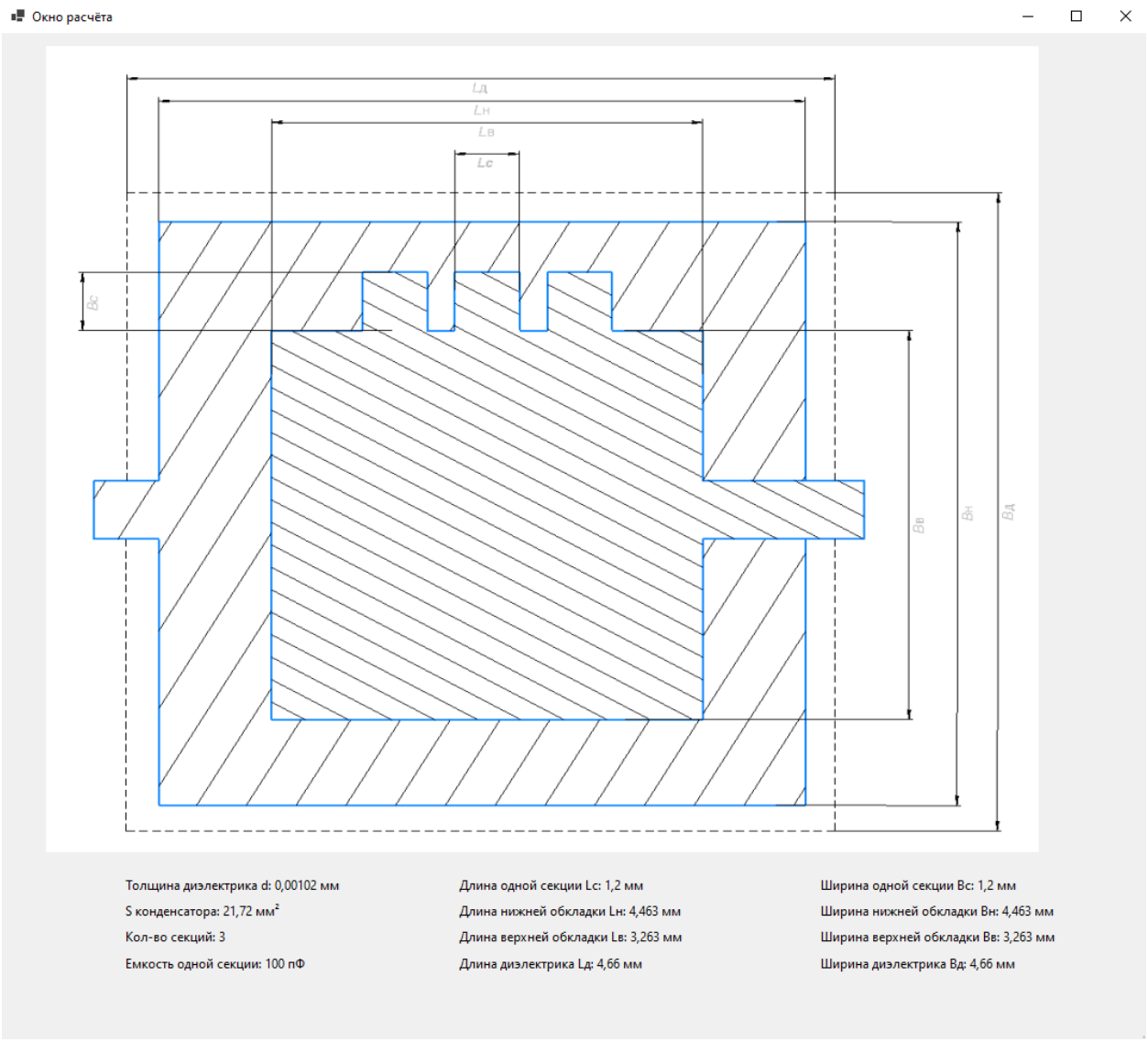


Рисунок 5.22 – Результаты расчётов

Теперь можем перейти к расчёту индуктивных элементов. Для этого вернемся в главное меню (рисунок 5.1). Далее " Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов". Начнём с индуктивности с максимально возможной добротностью (рисунок 5.23). Для расчётов возьмём: L=0.4 мкГн, f=50Мгц, h = 30 мкм.

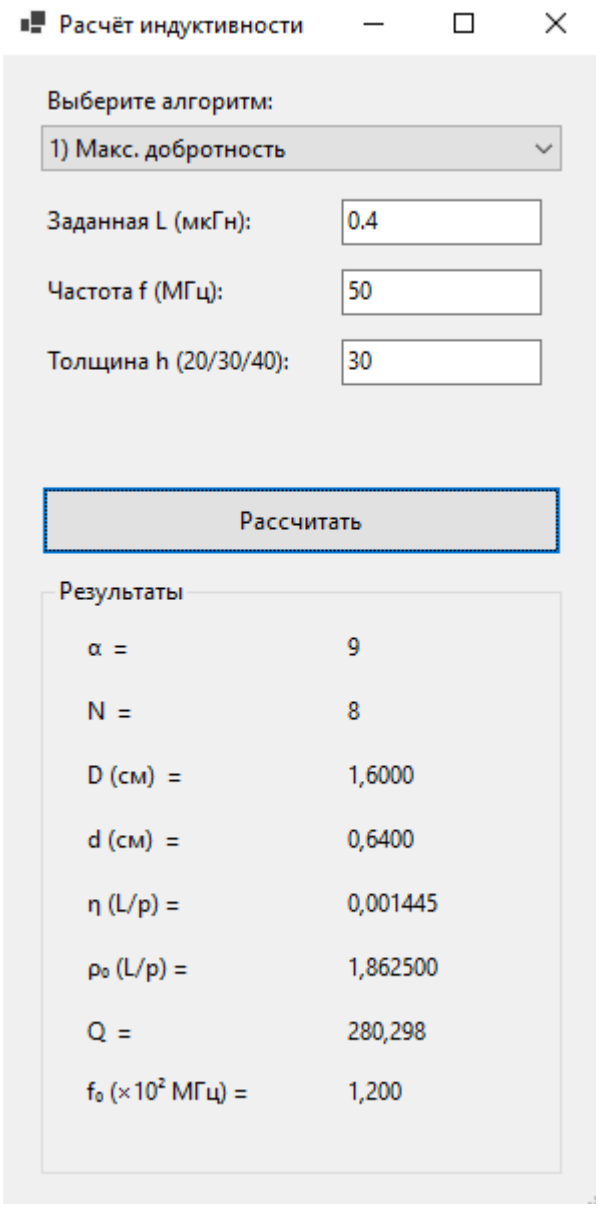


Рисунок 5.23 – Результаты расчётов 1 алгоритма

В этом окне мы получили результаты расчёта. Как и в расчётах вручную, у нас получилось D = 1.6 см, d = 0,64 см, α=9, N= 8, η=0.001445, ρ_0=1.86·10^3 Ом/□, Q = 280.298, f_0 = 1.2 ·10^2 МГц. Для первого алгоритма с максимально добротностью, программа работает, верно. Можно переходить ко второму алгоритму расчёта (рисунок 5.24). Для расчётов возьмём: L=0.4 мкГн, f=100Мгц, h = 40 мкм.

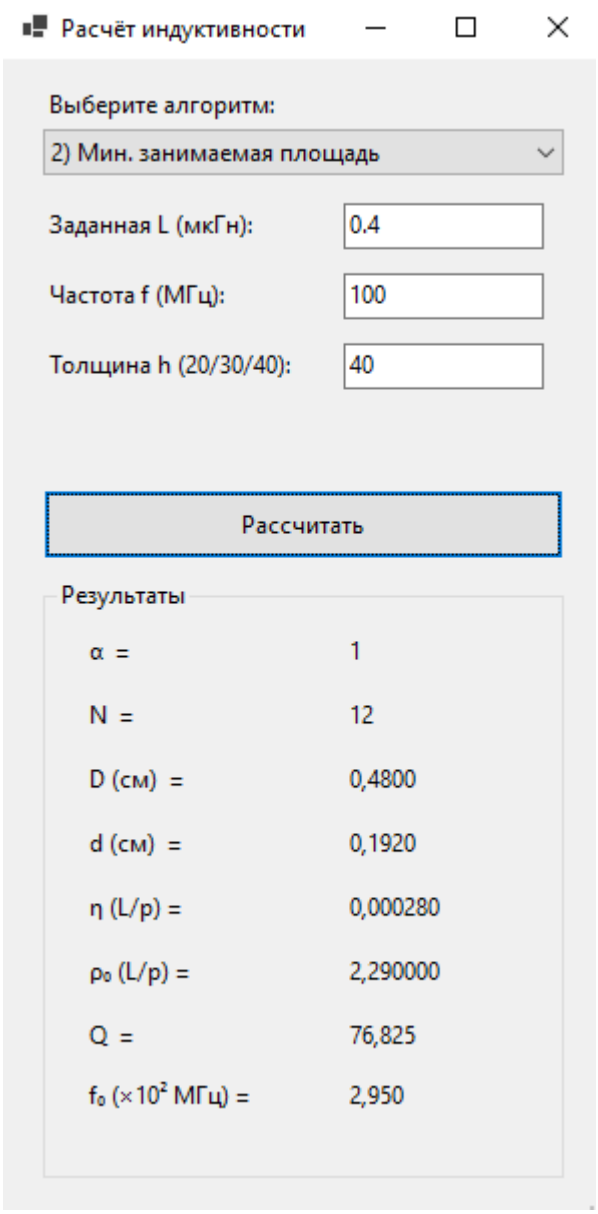


Рисунок 5.24 – Результаты расчётов 2 алгоритма

По итогу у нас получилось α=1, N= 12, η=0.00028, ρ_0=2.29·10^3 Ом/□, $Q = 76.825$, а частота собственного резонанса спирали f_0=2.950 ·10^2 Мгц. Что полностью сходится с ручными расчётами.

Переходим к расчету топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности. На рисунке 5.25 для примера расчётов взяли: L=0.05 мкГн, f=1000 Мгц, h = 20 мкм, Q=300.

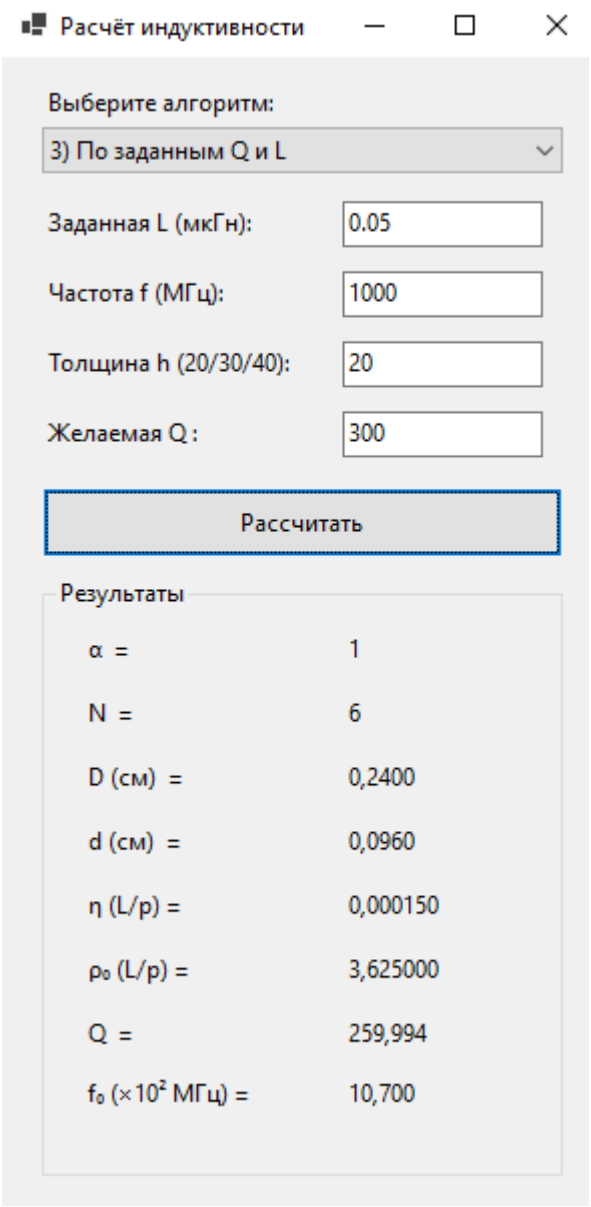


Рисунок 5.25 – Результаты расчётов 3 алгоритма

Программа выдала: ρ_0=3.625·10^3 Ом/□, Q=259.994, $\eta = 0.00015$, α=1, N=6, D= 0.24 см, $d = 0.096$ см, f_0=10.7 ·10^2 Мгц. Если сравнить с ручным расчётом, то всё верно работает, как и прошлые алгоритмы.

После того как все расчёты проверены. Осталось перечислить уведомления, какие может выдавать программа, если что-то идёт не так:

1. Толщина h – если ввести значение, например 26, то он приравняется к 30, если будет значение 25, то h=20.

2. Неверное значение в окне "Расчёт индуктивности". Если вводить некорректное число, то программа покажет в какой строчке ошибка, и предложит вариант исправления. При условии, что сразу в нескольких *textbox*'ах будет

некорректное значение, как на рисунке 5.26. Программа будет уведомлять об ошибках сверху вниз.

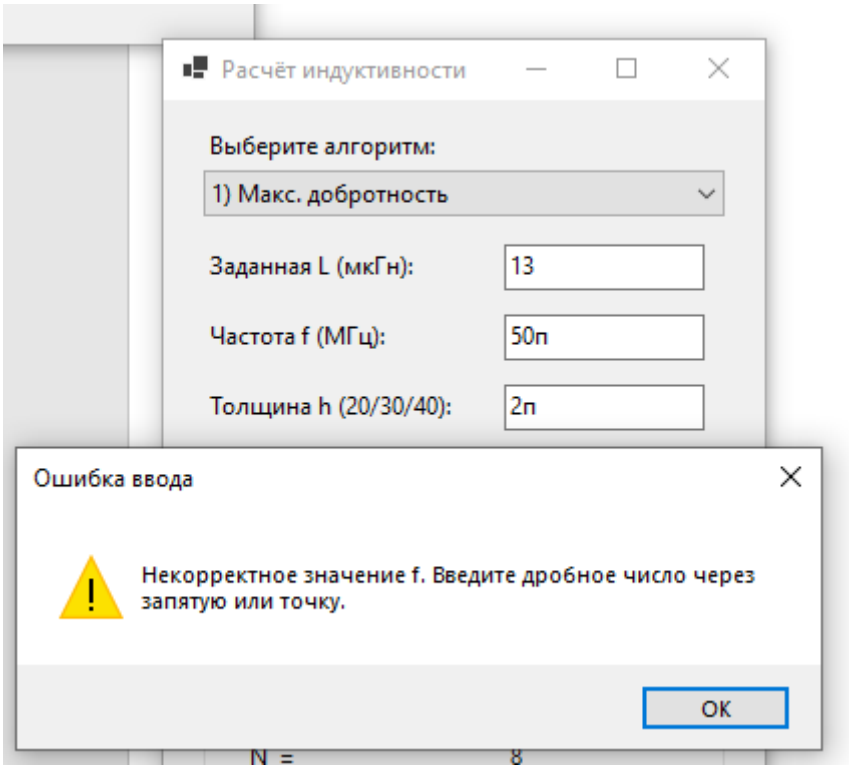


Рисунок 5.26 – Ошибка ввода

3. Учитывая специфику 3 алгоритма, где необходимо откладывать линии на номограмме. Далеко не при всех введенных данных, программа сможет рассчитать параметры индуктивного элемента. В этом случае программа выдаст предупреждение о том, что не смогла найти пару для заданных значений (рисунок 5.27).

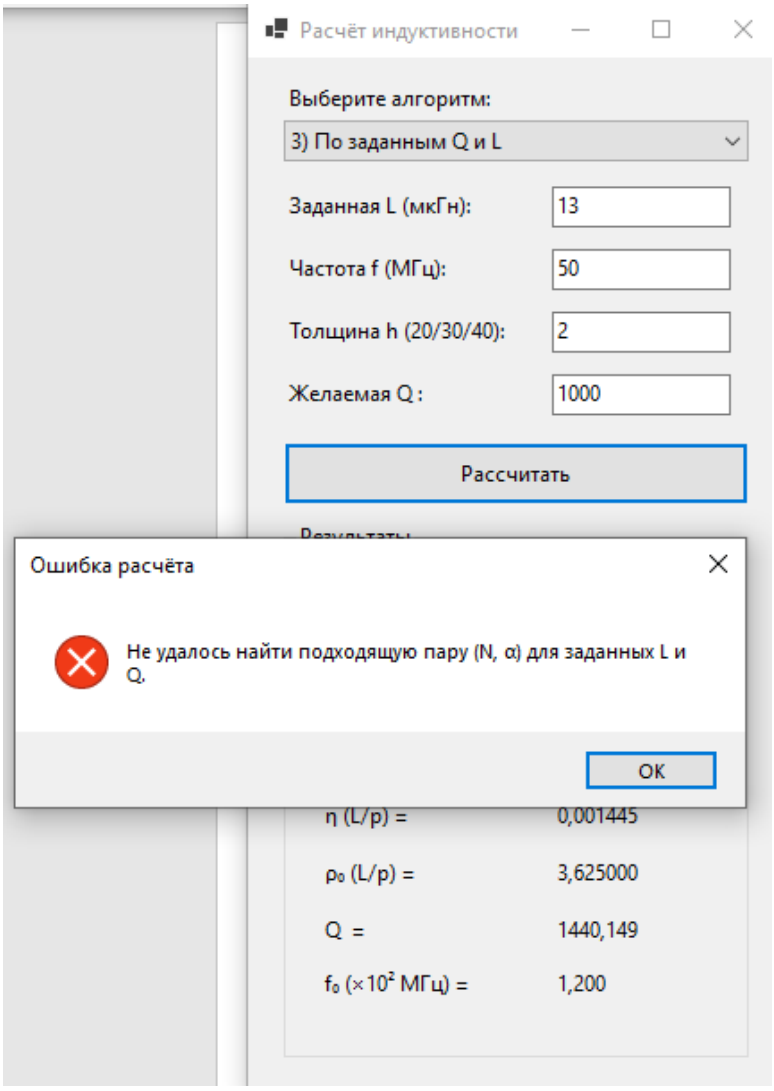


Рисунок 5.27 – Не удалось найти подходящую пару (N, α)

4. Ряд ошибок при неверном вводе данных при расчёте тонкоплёночного конденсатора. Начиная от не выбранного материала (рисунок 5.28), и для каждого *textbox*'а если вводить некорректное число, то программа покажет в какой строчке ошибка. Так же сверху вниз при нескольких ошибках. На рисунке 5.29 единичный пример ошибки. То же самое появляется, если некорректно ввести значение при добавлении материала.

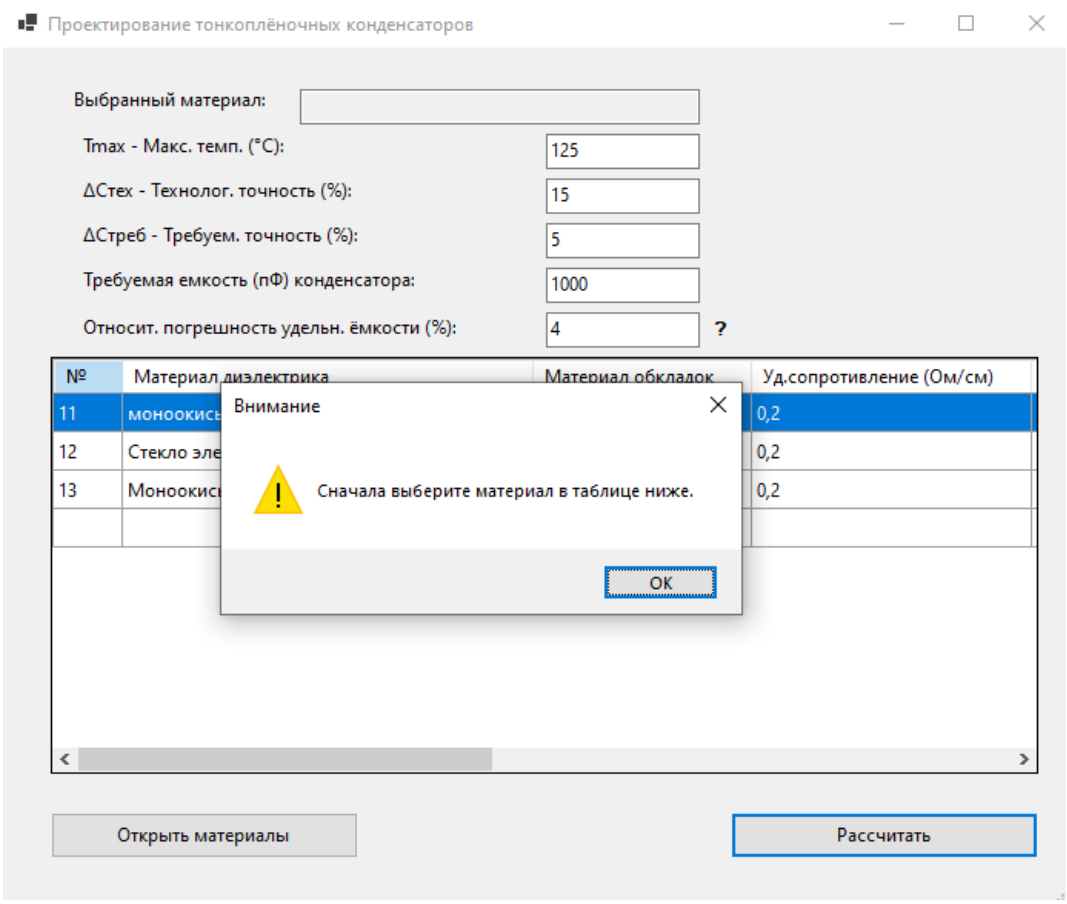


Рисунок 5.28 – Не выбран материал

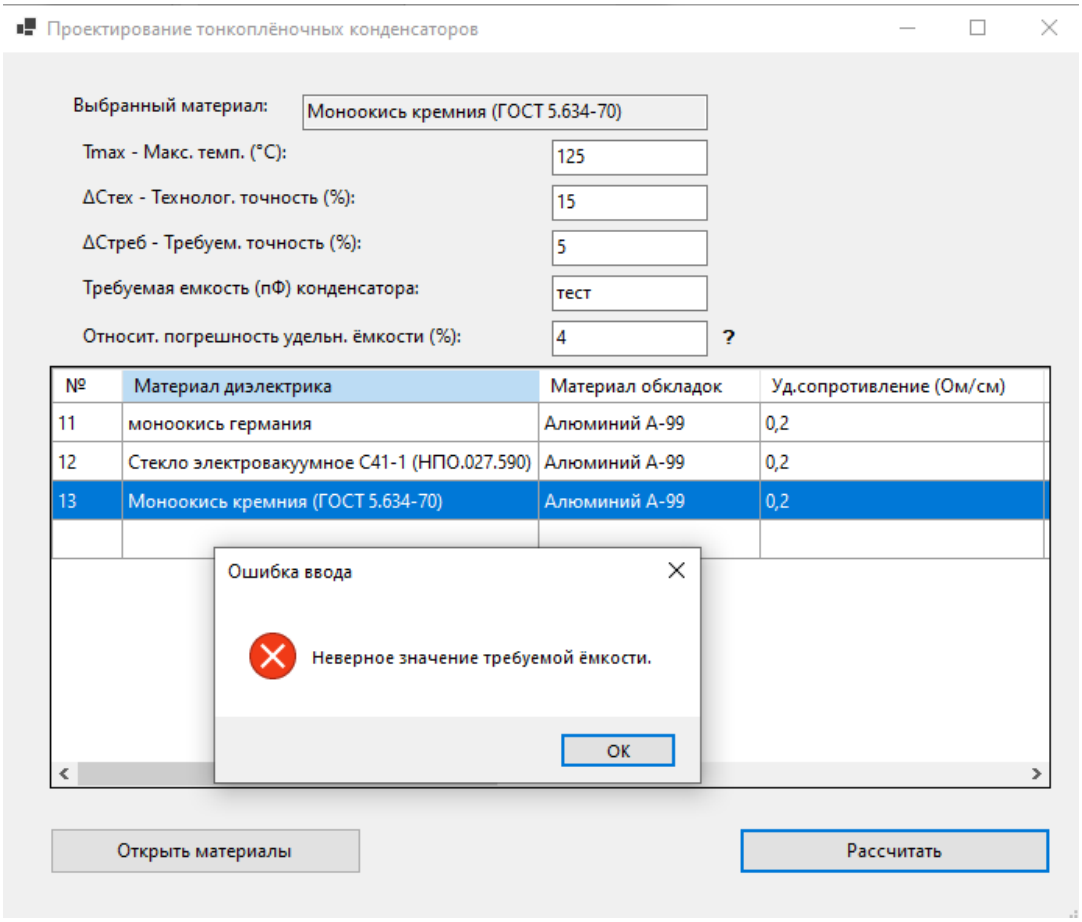


Рисунок 5.29 – Неверное значение в строчке

5. Если параметры позволяют избежать изготовления конденсатора сложной формой с подгоночными секциями, программа предупредит об этом (рисунок 5.30).

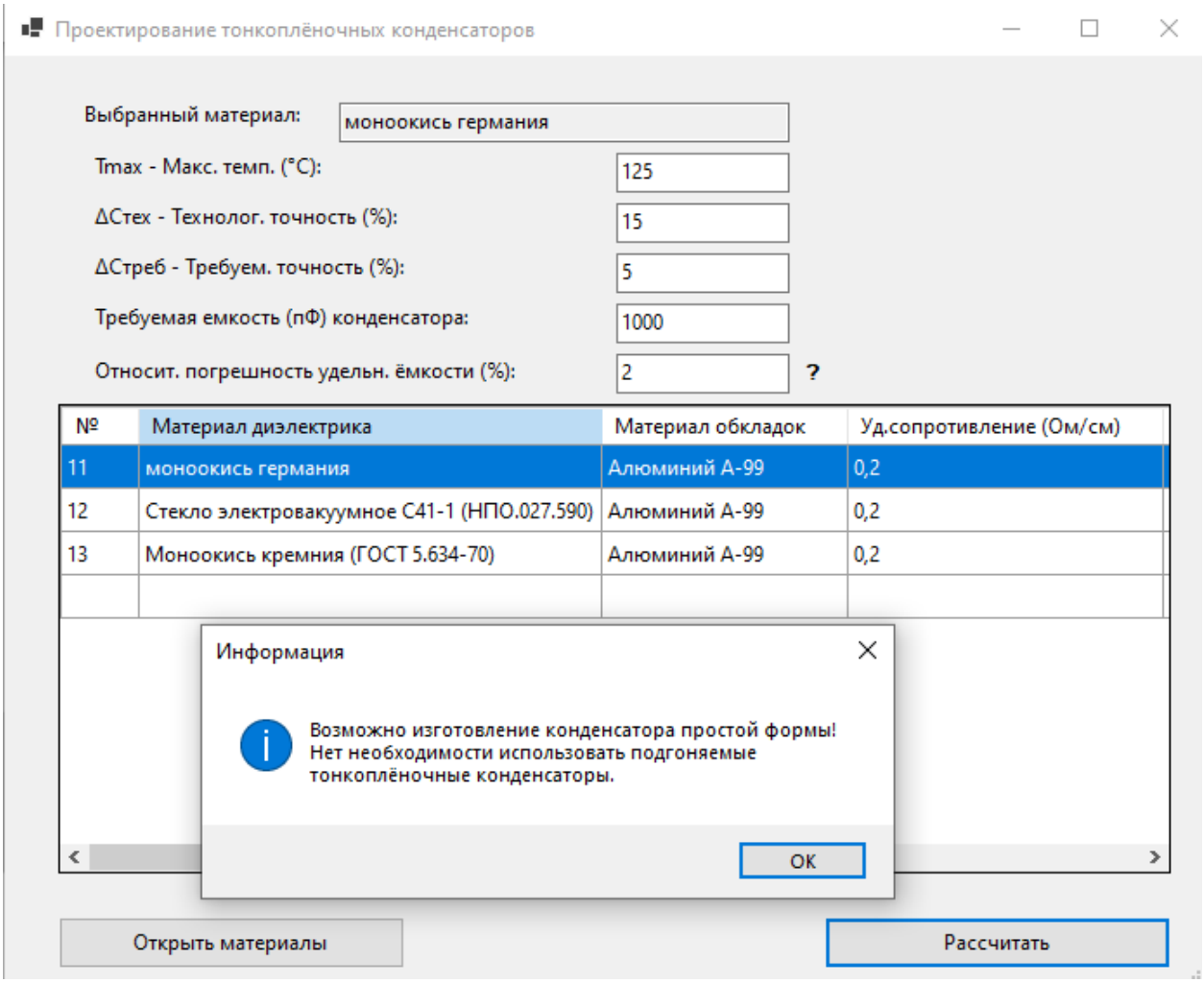


Рисунок 5.30 – Возможность изготовления конденсатора простой формы

6. Программа проверяет краевой эффект по формуле (2.14), если значение оказывается меньше 1. В таком случае выполнить конденсатор с заданными параметрами не получится, и программа предупредит об этом, как на рисунке 5.31.

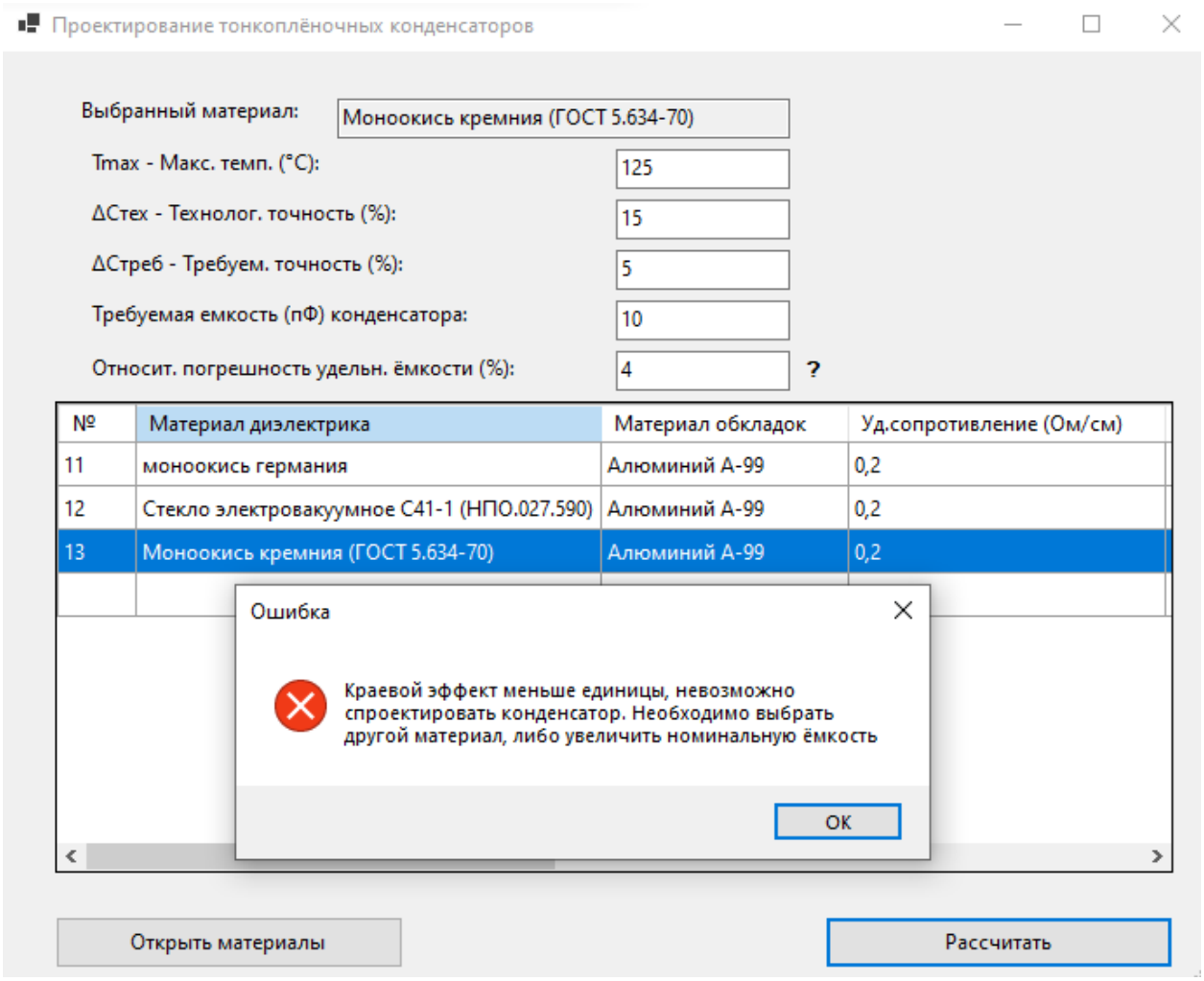


Рисунок 5.31 – Краевой эффект меньше единицы

6 Организация производственной безопасности при вакуумном напылении

В современных лабораторно-производственных комплексах при изготовлении тонкоплёночных конденсаторов на этапах вакуумного напыления и фотолитографии персонал сталкивается с сочетанием физических, химических и электрических опасностей. Процесс вакуумного напыления включает создание низкого давления (10^{-3}–10^{-6} Па) для осаждения тонкого слоя металла (обычно алюминия, золота или титана) на подготовленную подложку. Вакуумная камера при этом эксплуатируется с использованием мощных вакуумных насосов и высоковольтных источников питания (до нескольких сотен вольт), что порождает риск баротравм при внезапной утечке, электротравм в случае нарушения изоляции и поражения током при контакте с корпусом установки.

Параллельно на стадии фотолитографии применяются активные химические реагенты – фоторезисты на основе органических растворителей (ацетонитрил, изопропанол, ксилол и др.), а также УФ-облучение для формирования микроструктур. Эти вещества способны вызывать раздражение дыхательных путей, кожные и глазные поражения, а их пары обладают взрыво и пожароопасными свойствами. УФ-излучение в диапазоне 200–400 нм при незащищённом воздействии способен привести к серьёзным фотохимическим ожогам роговицы и сетчатки глаз. Таким образом, совокупность технологий требует строго выстроенной системы безопасности, включающей инженерно-технические, организационные и административные меры.

Прежде всего, оборудование для напыления и экспозиции должно быть оснащено герметичными камерами с аварийными разгрузочными клапанами, автоматически сбрасывающими давление при превышении установленных порогов. Все уплотнения и шланги подвергаются регулярной неразрушающей проверке на герметичность, а вакуумные насосы – техническому обслуживанию в соответствии с регламентом. Электропитание высоковольтных источников организуется через специализированные трансформаторные подстанции с обязательным заземлением и системами контроля изоляции. Кабели и разъёмы размещают в закрытых каналах, доступ к ним возможен только при полном отключении напряжения. На полах рабочих зон устанавливаются

диэлектрические коврики, а операторы обязаны применять перчатки со специальным электрозащитным покрытием.

Для локализации паров органических растворителей и фоторезистов используют закрытые вытяжные шкафы с пониженным давлением внутри рабочей зоны и высокопроизводительными фильтрами. Дополнительно устанавливаются стационарные и портативные газоанализаторы, которые в реальном времени измеряют концентрации летучих органических соединений; при превышении допустимых значений система переходит в аварийный режим, автоматически блокируя подачу химреактивов и активируя режим усиленной вентиляции. Двери и смотровые окна вытяжных шкафов оборудованы датчиками положения, не позволяющими начать процесс до полного закрытия и герметизации.

Защиту от УФ-излучения обеспечивают непрозрачные экранирующие кожухи и двери с автоматическими блокировками. При включении источников облучения все коммуникации и панели управления закрываются, а на наружных поверхностях появляется яркий красный индикатор «УФ-облучение включено». Операторы работают через смотровые окошки с УФ-фильтрами или используют защитные щитки и очки с классом фильтрации, соответствующим длинам волн 200–400 нм.

Организационная составляющая безопасности включает обязательное обучение всех сотрудников перед допуском к самостоятельной работе. Первичный инструктаж охватывает основы радиационной, электрической и химической безопасности, правила работы в условиях пониженного давления и использование средств индивидуальной защиты (СИЗ). Повторная аттестация проводится не реже одного раза в год с обязательным практическим отработкой действий при аварийных ситуациях. Все события, включая малейшие отклонения от технологического процесса, фиксируются в «Журнале происшествий и замечаний», а ежемесячные собрания по охране труда посвящены разбору инцидентов, корректировке инструкций и совершенствованию процедур.

СИЗ включают в себя химически стойкие комбинезоны, перчатки и одноразовую сменную обувь в «грязной зоне», а также специализированные респираторы и защитные очки с фильтрацией паров и УФ-излучения. Отдельное внимание уделяется чистоте «чистой зоны» после завершения процесса: все инструменты, контейнеры и подложки проходят дезактивацию в специальных моечных камерах, чтобы исключить перекрёстное загрязнение и накопление опасных остатков.

Алгоритм действий в аварийной ситуации предписывает следующие шаги:

1. Немедленное отключение электропитания и вакуумных насосов – ответственное лицо нажимает «красную кнопку» аварийного отключения.

2. Активация аварийной вентиляции по системе вытяжных клапанов и запуск резервных вентиляторов.

3. Эвакуация персонала через два независимых выхода, отмеченных на планах эвакуации, с обязательным сбором в безопасной зоне.

4. Оказание первой помощи пострадавшим (остановка кровотечения, промывание глаз и кожи, кислородная терапия при отравлении парами).

5. Оповещение служб пожарной охраны и службы охраны труда, составление подробного отчёта о происшествии, включающего время, причины, принятые меры и рекомендации по недопущению повторения.

Подобное многоуровневое сочетание инженерных решений, систем мониторинга, отработанных регламентов и дисциплинированного поведения персонала создаёт надёжную систему обеспечения безопасности жизнедеятельности в лабораториях и на производственных площадках. Постоянное совершенствование методик, интеграция новых сенсорных технологий и регулярное повышение квалификации сотрудников обеспечивают не только высокое качество тонкоплёночных конденсаторов, но и защищённость людей, работающих над их созданием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы была разработана комплексная методика, позволяющая автоматизировать проектирование тонкоплёночных конденсаторов и индуктивных спиралей с учётом реальных технологических отклонений. Основной задачей было создать алгоритмы, которые не только опираются на классические аналитические формулы, но и встраивают в расчёт эмпирические поправки, отражающие погрешности фотолитографии, шероховатость металла, температурные изменения диэлектриков и старение плёнок. В результате получено программное обеспечение, способное выдавать полный набор данных – от номинала "изготовления" до готовых эскизов тонкоплёночного конденсатора.

Обоснование подхода и анализ существующих методов

В первой части работы были подробно рассмотрены как классические аналитические модели (формула плоского конденсатора, упрощённые уравнения для расчёта индуктивностей спиралей), так и методы численного моделирования (*FEM*, *FDM*). Анализ показал, что чисто аналитические подходы при «идеализированных» допущениях не дают достаточно точный результат в условиях реального производства, а полностью численные расчёты требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. Поэтому для нашего случая был выбран гибридный путь: аналитика плюс эмпирика. Были собраны данные и публикации, где приводятся поправочные коэффициенты, учитывающие технологические "неидеальности" (шероховатость толстоплёночных токопроводов, допустимые отклонения фотолитографии, изменение диэлектрической постоянной при перепадах температуры). На их основе сформулированы алгоритмы, позволяющие сразу оценить, насколько "площадные" или "линейные" размеры будут отличаться от идеальных при выпуске изделия с завода.

1. Алгоритм дискретной подгонки тонкоплёночного конденсатора
Одной из ключевых особенностей тонкоплёночного конденсатора является то, что даже небольшие колебания толщины диэлектрика и вариации

фотолитографических допусков приводят к значительному разбросу фактической ёмкости. Чтобы гарантированно получить нужный номинал (например, с точностью ± 5 %), было предложено «делить» конденсатор на основную и несколько подстроечных секций. Сначала с учётом выбранного комплекса погрешностей (относительная нестабильность удельной ёмкости, температурная погрешность, процесс старения плёнки и технологическая разбежка размечающих масок) вычисляется "номинал изготовления" $C_{изг}$. Это значение больше требуемого номинала $C_{треб}$, чтобы даже в «худшем случае» (минимальная удельная ёмкость, максимальные допуски) итоговая ёмкость не оказалась ниже $C_{треб}$. Далее определяется максимальный «излишек» ёмкости, который нужно «срезать» дискретными секциями. Путём оценки минимальной возможной ёмкости одной площадки (минимальная площадь в 1 мм², сопутствующая ёмкость) рассчитывается число подстроечных секций n и ёмкость каждой из них C_c. После округления по технологически доступным размерам получено оптимальное разбиение: в примере для $C_{треб}$=1000 пФ это три подстроечных секции по 100 пФ каждая.

В завершение вычисляются геометрические размеры: площадь и габариты "основной" обкладки. Этот алгоритм гарантирует, что после изготовления тонкоплёночного конденсатора с учётом технологических погрешностей итоговая ёмкость будет лежать в требуемом диапазоне, при этом система "секций" позволяет эффективно править номинал без дополнительного вмешательства.

2. Методика расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных спиралей

Разработанная методика позволяет выбирать оптимальную форму и геометрию спирали в зависимости от задачи:

– если главное – максимизировать добротность Q, то выбирается круглое исполнение с отношением ширины дорожки к шагу $\alpha \approx 9$. При этом номинал индуктивности L изначально корректируется «+14 %», чтобы учесть уменьшение L после увеличения внутреннего диаметра (потребного для высоких Q);

– если же критична минимальная занимаемая площадь при заданном L, применяется квадратная спираль с α=1. В этом случае дорожки и зазоры равны, что обеспечивает самую плотную упаковку;

– заданные L и Q алгоритм строит по заранее полученным номограммам (зависимости L и Q от числа витков N и α) горизонтальную линию $Q=const$ и находит точку пересечения с кривой L (α, N). Таким образом одновременно находят одно оптимальное α и N, после чего вычисляют внешние и внутренние диаметры D, d, добротность и собственную резонансную частоту f_0.

В результате получена универсальная процедура, позволяющая находить оптимальные геометрические размеры и прогнозировать Q с погрешностью не более 10 %.

2. Программная реализация и проверка корректности

Все вышеперечисленные алгоритмы реализованы в виде консольного приложения на языке *CSharp* и разбиты на два основных модуля:

– расчёт конденсатора с дискретной подгонкой. Вводятся: запрошенный номинал $C_{треб}$, желаемая погрешность, свойства диэлектрика, технологические допуски. Программа выдаёт итоговый $C_{изг}$, число подстроечных секций n, ёмкость C_c каждой секции, площадь и габариты обкладок. В конце формируется отчёт, в котором показаны итоговые значения и эскиз конденсатора;

– расчёт топологии тонкоплёночной индуктивности. Существует выбор одного из трёх режимов (максимизация Q, минимизация площади, заданные L и Q). Алгоритм вычисляет α, N, D, d, оценочную Q и f_0. Номограммы в программе находятся в виде таблиц, которые помогают в автоматическом режиме рассчитывать параметры.

Ограничения и возможные направления дальнейшей работы
Несмотря на достигнутые успехи, в работе есть несколько очевидных ограничений:

– упрощённый учёт краевых эффектов. При очень маленьких размерах (несколько сотен микрометров и ниже) краевые эффекты становятся значимыми

и вносят дополнительно до 3–5 % погрешности. Для точных расчётов в этом диапазоне понадобятся более сложные модели;

– пределы высокочастотного диапазона. Методика спиралей разработана для частот МГц. При переходе в диапазон гигагерц эффекты близкодействия между витками и межвитковых паразитных ёмкостей начинают доминировать, и текущее упрощённое описание уже не даёт требуемой точности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тонкоплёночная электроника: учебник / А.Н. Головяшкин. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2022. – 284 с.

2. Аверин И.А., Головяшкин А.Н. Физика и технология тонких пленок: учеб. пособие / Под ред. проф. Р.М. Печерской. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009

3. Ермолаев А.А., Ядов В.И. Расчет топологии тонкоплёночных катушек индуктивности. Электронная техника, сер. VI, Микроэлектроника, 1969, вып. 5(20).

4. Разави, Б. Основы микроэлектроники. – Москва: *Wiley*, 2013. – 792 с.

5. Зиенкевич, О.Ч., Тейлор, Р.Л. Метод конечных элементов. – 5-е изд. – Оксфорд: *Butterworth-Heinemann*, 2000. – 640 с.

6. *Chen*, *T*., *Ren*, *J*. Машинное обучение в автоматизации проектирования электроники // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. – 2018. – Т. 37. – № 7. – С. 1225-1236.

7. *Smith*, *R*., *Brown*, *L*., *Lee*, *M*. Эмпирические модели для прогнозирования характеристик конденсаторов // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – *Т*. 117. – № 9. – С. 094504.

8. ГОСТ Р 12.0.004–2015. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. — М.: Стандартинформ, 2015.

9. СанПиН 2.2.4.548–96. Работа в лабораториях с вредными химическими веществами. — М.: Минздрав России, 1996.

10. Приказ Минтруда РФ от 24.11.2014 № 328н «Об обязательных требованиях охраны труда при использовании химических средств». — Зарегистрирован в Минюсте 15.12.2014, № 35040.

11. ГОСТ 12.1.005–88. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1988.

12. ГОСТ 12.1.033–2010. Вентиляция производственных помещений. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2010.

13. Методические указания по охране труда при эксплуатации вакуумных установок (утв. Ростехнадзором, 2012). — М.: Ростехнадзор, 2012.

14. Иванов И.С., Петров П.П. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. — М.: Наука, 2018.

15. Паспорт безопасности вещества “Ацетонитрил” [Электронный ресурс]. Режим доступа: *https://www.carlroth.com/medias/SDB-4380-RU-RU.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyODkyNDZ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEYzBMMmc1Tnk4NU1UZ3lNREE1TnpVek5qTXdMMU5FUWw4ME16Z3dYMUpWWDFKVkxuQmtaZ3xlOWUyNDVlZDMxOGQ5NTE5NmY1ZmZmNjQ5YzEwMTUwY2M2NzhlZWZmNGNmMDg1ZWNkZTJkOWY2MDE5NTBhYjQ5* (дата обращения: 02.06.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой
_____
(фамилия, имя, отчество)
«22» 05 2025 г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 23ПДм1 факультета ФИТЭ
Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Магистерская программа Нано- и микроэлектроника
Малышев С.А.
(фамилия, инициалы)

2. Руководитель Головяшкин А.Н.
фамилия, инициалы)

3. Тема выпускной работы Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов

Тема утверждена приказом ПГУ № 588/о от « 28 » 04 2025 г.

4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.) Исследовать влияние технологических параметров и конструктивных особенностей тонкоплёночных конденсаторов на их электрические характеристики. Разработать универсальный алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных конденсаторов и индуктивностей с учётом технологических допусков, температурных воздействий и старения материалов. Реализовать алгоритмы в виде программного обеспечения для автоматизации проектирования параметров тонкоплёночных конденсаторов и индуктивностей. Провести оптимизацию алгоритмов расчёта и проверить корректность работы программного продукта на примерах проектирования высокоточных тонкоплёночных пассивных элементов.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Анализ существующих алгоритмов
2 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора
3 Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов
4 Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов
4.1 Расчет топологии индуктивности с максимально возможной добротностью
4.2 Расчет топологии индуктивности на минимальной занимаемой площади
4.3 Расчет топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности
5 Обзор программного обеспечения
5.1 Общие сведения
5.2 Функциональные возможности и интерфейс

5.3 Проверка расчётов и различные уведомления
6 Организация производственной безопасности при вакуумном напылении

5.2. Иллюстративная часть (перечень и название слайдов презентации)

1. Титульный слайд	Слайд 1
2. Цели и задачи исследования	Слайд 2
3. Анализ существующих алгоритмов	Слайд 3
4. Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора	Слайд 4-7
5. Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов	Слайд 8-12
6. Организация производственной безопасности при вакуумном напылении	Слайд 13
7. Переход к обзору программного обеспечения	Слайд 14

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный план по выполнению выпускной работы магистра

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Анализ существующих алгоритмов	10%	22.05.2025	
Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора	15%	24.05.2025	
Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов	15%	26.05.2025	
Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов	10%	28.05.2025	
Обзор программного обеспечения	25%	29.05.2025	
Организация производственной безопасности при вакуумном напылении	10%	2.06.2025	
Графическая часть	10%	2.06.2025	
Оформление пояснительной записки	5%	3.06.2025	

Дата выдачи задания «22» мая 2025 г.

Руководитель выпускной работы _____ Головяшкин А.Н.
подпись фамилия, инициалы

Задание к исполнению принял _____ Малышев С.А.
подпись фамилия, инициалы

«22» мая 2025г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета _____ Кревчик В.Д.
подпись фамилия, инициалы

«16» 06 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Список публикаций

В рамках ВКР были написаны статьи:

– Головяшкин А.Н., Малышев С.А. Расчёт топологии тонкоплёночных индуктивных элементов// Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2024. – Т. 2. – С. 150-154.

– Головяшкин А.Н., Ильин Н.И., Малышев С.А., Баннов В. Я. Обучение нейронной сети с подкреплением в робототехнике// Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2025.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа расчета параметров конденсатора и индуктивности в среде программирования *Visual Studio*

Form1.cs

```
using System;
using System.Data;
using System.Windows.Forms;
using static System.Windows.Forms.VisualStyles.VisualStyleElement.ListView;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
   public partial class Form1 : Form
   {
      private DatabaseManager db = new DatabaseManager();

      // Хранит ID выбранного материала; по умолчанию –1 (ни один материал не выбран).
      private int selectedMaterialId = -1;
      private int chosenSectionsCount = 0;

      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
         LoadData();
         dataGridView1.CellDoubleClick += dataGridView1_CellDoubleClick;
      }

      private void btnOpenMaterials_Click(object sender, EventArgs e)
      {
         Form2 form2 = new Form2(this);
         form2.ShowDialog();
         LoadData();
      }
```

```
private void btnCalculate_Click(object sender, EventArgs e)
{
    // 1) Проверяем, что материал был выбран
    if (selectedMaterialId < 0)
    {
        MessageBox.Show(
            "Сначала выберите материал в таблице ниже.",
            "Внимание",
            MessageBoxButtons.OK,
            MessageBoxIcon.Warning
        );
        return;
    }

    // 2) Получаем строку из БД по выбранному ID
    DataRow row = db.GetMaterialData(selectedMaterialId.ToString());
    if (row == null)
    {
        MessageBox.Show(
            "Не удалось найти материал с таким ID.",
            "Ошибка",
            MessageBoxButtons.OK,
            MessageBoxIcon.Error
        );
        return;
    }

    // 3) Считываем из row все поля выбранного материала:
```

```
        string dielectricMaterial = row["DielectricMaterial"].ToString();
        string coverMaterial = row["CoverMaterial"].ToString();

        double coverResistivity = Convert.ToDouble(row["CoverResistivity"]);
        double capacitanceDensity = Convert.ToDouble(row["CapacitanceDensity"]);
        double electricStrength = Convert.ToDouble(row["ElectricStrength"]);
        double dielectricPermittivity =
Convert.ToDouble(row["DielectricPermittivity"]);
        double tgDelta = Convert.ToDouble(row["TgDelta"]);
        double workingFrequency = Convert.ToDouble(row["WorkingFrequency"]);
        double tce = Convert.ToDouble(row["TCE"]);

        // 4) Считываем значения из полей ввода пользователя:
        if (!double.TryParse(txtTmax.Text, out double Tmax))
        {
            MessageBox.Show(
                "Неверное значение Tmax.",
                "Ошибка ввода",
                MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Error
            );
            return;
        }
        if (!double.TryParse(txtDeltaTech.Text, out double DeltaTech))
        {
            MessageBox.Show(
                "Неверное значение ΔCтех.",
                "Ошибка ввода",
                MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Error
```

```
            );
            return;
        }
        if (!double.TryParse(txtDeltaRequired.Text, out double DeltaRequired))
        {
            MessageBox.Show(
                "Неверное значение ΔСтреб.",
                "Ошибка ввода",
                MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Error
            );
            return;
        }
        if (!double.TryParse(txtRequiredCapacity.Text, out double
RequiredCapacity))
        {
            MessageBox.Show(
                "Неверное значение требуемой ёмкости.",
                "Ошибка ввода",
                MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Error
            );
            return;
        }
        if (!double.TryParse(txtRelativeError.Text, out double RelativeError))
        {
            MessageBox.Show(
                "Неверное значение относительной погрешности.",
                "Ошибка ввода",
                MessageBoxButtons.OK,
```

```
                MessageBoxIcon.Error
            );
            return;
        }
        double TKE = tce * 0.0001;
        double GammaCt = TKE * (Tmax - 20)*100;
        double GammaSdop = DeltaRequired - RelativeError- GammaCt -
electricStrength;

        if (GammaSdop > 0)
        {
            MessageBox.Show(
                "Возможно изготовление конденсатора простой формы! " +
                "Нет необходимости использовать подгоняемые тонкоплёночные
конденсаторы.",
                "Информация",
                MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Information
            );
            return;
        }

        double K = 0;
        if ((RequiredCapacity / (capacitanceDensity/100)) >= 5)
        {
            K = 1;
        }
        else if ((RequiredCapacity / (capacitanceDensity /100 )) < 5 &&
(RequiredCapacity / (capacitanceDensity / 100)) >= 1)
        {
```

```
            K = 1.3 - 0.06 * (RequiredCapacity / (capacitanceDensity / 100));
        }
        else
        {
            MessageBox.Show("Краевой эффект меньше единицы, невозможно спроектировать конденсатор. Необходимо выбрать другой материал, либо увеличить номинальную ёмкость", "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
            // Прерывание выполнения метода
        }
        double Cizgot = RequiredCapacity / (1.0 - DeltaTech/100);
        double deltaCmax = Cizgot * 0.15;
        double Cmax = Cizgot + deltaCmax;
        double deltaC = Cmax - RequiredCapacity;
        double Smin = 1;
        double C0min = capacitanceDensity/100 * Smin;
        double nmax = deltaC / C0min;
        int nn = (int)Math.Floor(nmax);

        if (nn > 10) nn = 10;

        // Вызываем показ окна выбора секций:
        ShowSectionSelector(nn);
        if (chosenSectionsCount > 0)
        {
            double epsil0 = 8.85 + Math.Pow(10, -3);
            double d = epsil0 * dielectricPermittivity / capacitanceDensity/10;
            d = Math.Round(d, 5);
            double C0v = (dielectricPermittivity * epsil0 * Math.Pow(10, -3)) / d;
            double nnn = chosenSectionsCount;
```

```
            double C0minstrih = RequiredCapacity / (3 * (2 * nnn - 1));
            double newC0 = Math.Min(C0v, C0minstrih);
            double Cmin0 = newC0 * (1 - DeltaRequired / 100);
            double Cmin = RequiredCapacity * (1 - DeltaRequired / 100);
            double Smax = Cmin / Cmin0;
            double Cmax0 =  newC0 * (1 + DeltaRequired / 100);
            double Cc = (C0min * nn) / nnn;
            double Sc = Cc / Cmax0;
            double Sosn = Smax - nnn * Sc;
            double deltaL = 0.01;
            double Kf = 1;
            double L1 = Math.Round(Math.Sqrt(((deltaL / 2) * (deltaL / 2)) * (1 + Kf)
* (1 + Kf) + Sosn * Kf) - deltaL / 2 * (1 + Kf), 3);
            double B1 = Math.Round(Math.Sqrt(((deltaL / 2) * (deltaL / 2)) * ((1 + Kf)
* (1 + Kf)) / (Kf * Kf) + Sosn / Kf) - (deltaL / 2) * (1 + Kf), 3);
            double Lc = Math.Round (Math.Sqrt(Sc),2);
            double Bc = Lc;

            double m = 0;
            if (nnn >= 5)
            {
               m = 1;
            }
            else if (nnn < 5 && nnn >= 1)
            {
               m = 2;
            }
            double f = 0.1;
            double Ln1 = L1 + Lc * 2 / m;
            double Bn1 = Ln1;
```

```
        double Ld1 = Math.Round(Ln1 + 2 * f, 2);
        double Bd1 = Ld1;
        double Skond = Math.Round(Ld1 * Bd1, 2);

        Form3 form3 = new Form3
        {
            Result = d,
            Sosn = Skond,
            n = nnn,
            Lc = Lc,
            Bc = Bc,
            Ld = Ld1,
            Bd = Bd1,
            Lv = L1,
            Bv = B1,
            Ln = Ln1,
            Bn = Bn1,
            C = Cc
        };
        form3.ShowDialog();
    }
}
/// Показывает окно с надписью и динамическими кнопками от 1 до count.
private void ShowSectionSelector(int count)
{

    Form dlg = new Form();
    dlg.StartPosition = FormStartPosition.CenterParent;
    dlg.FormBorderStyle = FormBorderStyle.FixedDialog;
    dlg.MaximizeBox = false;
```

```
        dlg.MinimizeBox = false;
        dlg.ShowInTaskbar = false;
        dlg.Text = "Выбор количества секций";
        dlg.AutoSize = true;
        dlg.AutoSizeMode = AutoSizeMode.GrowAndShrink;
        dlg.Padding = new Padding(10);

        Label lblPrompt = new Label();
        lblPrompt.AutoSize = true;
        lblPrompt.Text = $"Максимальное кол-во подгоночных секций = {count}.
Какое кол-во секций необходимо?";
        lblPrompt.Location = new Point(10, 10);
        dlg.Controls.Add(lblPrompt);

        FlowLayoutPanel panel = new FlowLayoutPanel();
        panel.FlowDirection = FlowDirection.LeftToRight;
        panel.AutoSize = true;
        panel.WrapContents = true;
        panel.Padding = new Padding(0);
        panel.Margin = new Padding(0);

        int gap = 10;
        panel.Location = new Point(10, lblPrompt.Bottom + gap);

        dlg.Controls.Add(panel);

        for (int i = 1; i <= count; i++)
        {
            Button btn = new Button();
            btn.Text = i.ToString();
```

```
            btn.Tag = i; // запомним номер в Tag
            btn.AutoSize = true;
            btn.Margin = new Padding(5);
            btn.Click += SectionButton_Click;
            panel.Controls.Add(btn);
        }

        dlg.ShowDialog(this);
    }

    private void SectionButton_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (!(sender is Button btn) || !(btn.Tag is int i))
            return;

        if (i == 1)
        {
            // Одно сообщение-диалог с полным текстом и кнопками «Да/Нет»
            DialogResult res = MessageBox.Show(
                "Используя одну секцию, невозможно получить точность выше 5%. " +
                "Такую высокую точность мы можем получить только при максимально " +
                "возможном количестве секций. Также использование конструкции с одной " +
                "подгоночной секцией при производстве могут появиться факторы, " +
                "которые не были учтены, и такой конденсатор не сможет достичь заданной точности.\n\n" +
                "Вы уверены, что хотите выбрать 1 секцию?",
```

```
                "Предупреждение",
                MessageBoxButtons.YesNo,
                MessageBoxIcon.Warning
            );

            if (res == DialogResult.Yes)
            {
                chosenSectionsCount = 1;
                btn.FindForm().Close();
            }
            // Если пользователь нажал «Нет», окно останется открытым и можно выбрать другую кнопку
        }
        else
        {
            // Логика для i > 1 остаётся прежней:
            DialogResult res = MessageBox.Show(
                $"Вы уверены, что хотите выбрать {i} кол-во секций?",
                "Подтверждение выбора",
                MessageBoxButtons.YesNo,
                MessageBoxIcon.Question
            );

            if (res == DialogResult.Yes)
            {
                chosenSectionsCount = i;
                btn.FindForm().Close();
            }
            // Если «Нет» — окно с кнопками остаётся открытым
        }
```

```
    }

    private void dataGridView1_CellDoubleClick(object sender,
DataGridViewCellEventArgs e)
    {
        if (e.RowIndex < 0 || e.RowIndex >= dataGridView1.Rows.Count) return;

        DataGridViewRow row = dataGridView1.Rows[e.RowIndex];
        dataGridView1.ClearSelection();
        row.Selected = true;



        selectedMaterialId = Convert.ToInt32(row.Cells["Id"].Value);
        txtSelectedMaterial.Text = row.Cells["DielectricMaterial"].Value.ToString();
    }

    public void LoadData()
    {
        DataTable table = db.GetAllData();
        dataGridView1.DataSource = table;
        dataGridView1.ClearSelection();

        if (dataGridView1.Columns.Contains("Id"))
            dataGridView1.Columns["Id"].HeaderText = "№";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("DielectricMaterial"))
            dataGridView1.Columns["DielectricMaterial"].HeaderText = "Материал
диэлектрика";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("CoverMaterial"))
            dataGridView1.Columns["CoverMaterial"].HeaderText = "Материал
обкладок";
```

```
            if (dataGridView1.Columns.Contains("CoverResistivity"))
                dataGridView1.Columns["CoverResistivity"].HeaderText =
"Уд.сопротивление (Ом/см)";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("CapacitanceDensity"))
                dataGridView1.Columns["CapacitanceDensity"].HeaderText =
"Уд.ёмкость C0 (пФ/см²)";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("ElectricStrength"))
                dataGridView1.Columns["ElectricStrength"].HeaderText = "Коэффициент
старения 1/час·10⁻⁶";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("DielectricPermittivity"))
                dataGridView1.Columns["DielectricPermittivity"].HeaderText =
"Диэлектр. проникн. ε";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("TgDelta"))
                dataGridView1.Columns["TgDelta"].HeaderText = "tg δ";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("WorkingFrequency"))
                dataGridView1.Columns["WorkingFrequency"].HeaderText = "Частота
(МГц)";
            if (dataGridView1.Columns.Contains("TCE"))
                dataGridView1.Columns["TCE"].HeaderText = "ТКЕ·10⁻⁴ (1/°C)";
        }
    }
}
```

Form2.cs

```
using System;
using System.Data;
using System.Windows.Forms;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
```

```
public partial class Form2 : Form
{
    private DatabaseManager db;
    private Form1 mainForm;

    public Form2(Form1 form)
    {
        InitializeComponent();
        mainForm = form;
        db = new DatabaseManager();

        // 1) сразу загружаем данные
        LoadData();

        // 2) подписываемся на двойной клик по ячейке
        dataGridView1.CellDoubleClick += dataGridView1_CellDoubleClick;
    }

    private void LoadData()
    {
        // Получаем все записи из таблицы Materials
        DataTable table = db.GetAllData();
        dataGridView1.DataSource = table;

        // Сбрасываем текущее выделение
        dataGridView1.ClearSelection();

        if (dataGridView1.Columns.Contains("Id"))
            dataGridView1.Columns["Id"].HeaderText = "№";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("DielectricMaterial"))
```

```
            dataGridView1.Columns["DielectricMaterial"].HeaderText = "Материал диэлектрика";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("CoverMaterial"))
            dataGridView1.Columns["CoverMaterial"].HeaderText = "Материал обкладок";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("CoverResistivity"))
            dataGridView1.Columns["CoverResistivity"].HeaderText = "Уд.сопротивление (Ом/см)";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("CapacitanceDensity"))
            dataGridView1.Columns["CapacitanceDensity"].HeaderText = "Уд.ёмкость C0 (пФ/см²)";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("ElectricStrength"))
            dataGridView1.Columns["ElectricStrength"].HeaderText = "Коэффициент старения 1/час·10⁻⁶";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("DielectricPermittivity"))
            dataGridView1.Columns["DielectricPermittivity"].HeaderText = "Диэлектр. проникн. ε";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("TgDelta"))
            dataGridView1.Columns["TgDelta"].HeaderText = "tg δ";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("WorkingFrequency"))
            dataGridView1.Columns["WorkingFrequency"].HeaderText = "Частота (МГц)";
        if (dataGridView1.Columns.Contains("TCE"))
            dataGridView1.Columns["TCE"].HeaderText = "ТКЕ·10⁻⁴ (1/°C)";
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        // Текст «Добавить материал» открывает Form4, затем обновляем таблицу
        Form4 form4 = new Form4();
```

```
            form4.ShowDialog();
            LoadData();
        }

        private void btnDeleteMaterial_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (dataGridView1.SelectedRows.Count > 0)
            {
                var result = MessageBox.Show(
                    "Удалить выбранный материал?",
                    "Подтверждение",
                    MessageBoxButtons.YesNo,
                    MessageBoxIcon.Warning
                );
                if (result == DialogResult.Yes)
                {
                    int id = Convert.ToInt32(dataGridView1.SelectedRows[0].Cells["Id"].Value);
                    db.DeleteMaterialById(id);
                    LoadData();
                }
            }
            else
            {
                MessageBox.Show("Выберите строку для удаления.", "Внимание", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information);
            }
        }
```

```
        private void dataGridView1_CellDoubleClick(object sender,
DataGridViewCellEventArgs e)
        {
            // Если двойной клик пришёлся по строке (не по заголовку)
            if (e.RowIndex >= 0 && dataGridView1.Rows.Count > e.RowIndex)
            {
                DataGridViewRow row = dataGridView1.Rows[e.RowIndex];

                // Подсветить эту строку
                dataGridView1.ClearSelection();
                row.Selected = true;

                // Записать в Form1.Id (если нужно вернуть выбор), например:
                mainForm.txtSelectedMaterial.Text                                =
row.Cells["DielectricMaterial"].Value.ToString();



            }
        }
    }
}
```

Form3.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Reflection;
using System.Reflection.Emit;
```

```
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
    public partial class Form3 : Form
    {
        public double Result { get; set; }
        public double Sosn { get; set; }
        public double n { get; set; }
        public double Lc { get; set; }
        public double Bc { get; set; }
        public double C { get; set; }
        public double Ld { get; set; }
        public double Bd { get; set; }
        public double Lv { get; set; }
        public double Bv { get; set; }
        public double Ln { get; set; }
        public double Bn { get; set; }


        public Form3()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void Form3_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            label1.Text = "Толщина диэлектрика d: " + Result.ToString() + " мм";
```

```
        label2.Text = "S конденсатора: " + Sosn.ToString() + " мм²";
        label3.Text = "Кол-во секций: " + n.ToString();
        label4.Text = "Длина одной секции Lc: " + Lc.ToString() + " мм";
        label5.Text = "Длина нижней обкладки Lн: " + Ln.ToString() + " мм";
        label6.Text = "Длина верхней обкладки Lв: " + Lv.ToString() + " мм";
        label7.Text = "Длина диэлектрика Lд: " + Ld.ToString() + " мм";
        label8.Text = "Ширина одной секции Bc: " + Bc.ToString() + " мм";
        label9.Text = "Ширина нижней обкладки Bн: " + Bn.ToString() + " мм";
        label10.Text = "Ширина верхней обкладки Bв: " + Bv.ToString() + " мм";
        label11.Text = "Ширина диэлектрика Bд: " + Bd.ToString() + " мм";
        label12.Text = "Емкость одной секции: " + C.ToString() + " пФ";



        // Проверяем значение переменной "n"
        if (n >= 1 && n <= 10)
        {
            string imageName = $"{n}.png"; // Формируем имя файла изображения
            string resourcePath = $"ThinFilmCapacitorDesign.source.{imageName}";

            // Загружаем изображение из внедренных ресурсов
            Assembly assembly = Assembly.GetExecutingAssembly();
            using (Stream stream =
assembly.GetManifestResourceStream(resourcePath))
            {
                if (stream != null)
                {
                    pictureBox1.Image = Image.FromStream(stream);
                }
            }
```

```
            }
            else
            {

                MessageBox.Show("Неверное значение переменной 'n'");
            }
        }
    }
}
```

Form4.cs

```
using System;
using System.Windows.Forms;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
    public partial class Form4 : Form
    {
        private DatabaseManager db;

        public Form4()
        {
            InitializeComponent();
            db = new DatabaseManager();
            db.CreateDatabase();
        }

        private void btnInsert_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            string dielectric = txtDielectric.Text;
```

```
            string cover = txtCover.Text;
            if (double.TryParse(txtCoverResistivity.Text, out double coverResistivity)
&&
                double.TryParse(txtCapacitanceDensity.Text, out double
capacitanceDensity) &&
                double.TryParse(txtElectricStrength.Text, out double electricStrength) &&
                double.TryParse(txtDielectricPermittivity.Text, out double
dielectricPermittivity) &&
                double.TryParse(txtTgDelta.Text, out double tgDelta) &&
                double.TryParse(txtWorkingFrequency.Text, out double
workingFrequency) &&
                double.TryParse(txtTCE.Text, out double tce))
            {
                db.InsertData(dielectric, cover, coverResistivity, capacitanceDensity,
electricStrength,
                              dielectricPermittivity, tgDelta, workingFrequency, tce);
                MessageBox.Show("Материал добавлен.", "Успех",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information);
                this.Close();
            }
            else
            {
                MessageBox.Show("Неверные числовые данные.", "Ошибка",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
            }
        }

        private void lblCapacitanceDensity_Click(object sender, EventArgs e)
        {
```

```
        }
    }
}
```

InductanceForm.cs

```
using System;
using System.Data;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;
using System.Globalization;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
    public partial class InductanceForm : Form
    {
        private DataTable dtMerged1;    //  «Таблица 1»
        private DataTable dtLpByFh;     // «Таблица 3» (f, h → L/p)

        public InductanceForm()
        {
            InitializeComponent();

            // Построим справочники сразу при запуске:
            dtMerged1 = TablesProvider.BuildMergedTable_Figure1();
            dtLpByFh = TablesProvider.BuildLpByFhTable();

            // По умолчанию выберем «Первый алгоритм»:
            comboAlgorithm.SelectedIndex = 0;
            UpdateControlsByAlgorithm();
        }
```

```
        private void comboAlgorithm_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs
e)
        {
            UpdateControlsByAlgorithm();
        }


        private void UpdateControlsByAlgorithm()
        {
            // Если выбран алгоритм № 3 (индекс = 2), то поле «Q» включаем; иначе
— скрываем.
            bool isAlg3 = (comboAlgorithm.SelectedIndex == 2);
            lblQInput.Visible = isAlg3;
            txtQInput.Visible = isAlg3;
        }

        private void btnCalculate_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            switch (comboAlgorithm.SelectedIndex)
            {
                case 0:
                    RunFirstAlgorithm();
                    break;
                case 1:
                    RunSecondAlgorithm();
                    break;
                case 2:
                    RunThirdAlgorithm();
                    break;
```

```
            default:
                MessageBox.Show("Неопознанный алгоритм.", "Ошибка",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
                break;
        }
    }

    //
    ---------------------------------------------------------------------

    // 1. Первый алгоритм: «Максимальная добротность»
    //
    ---------------------------------------------------------------------

    private void RunFirstAlgorithm()
    {
        // 1.1) Считываем L_user, f_user, h_user:
        if (!TryParseDouble(txtLInput.Text.Trim(), out double L_user, "L")) return;
        if (!TryParseDouble(txtFInput.Text.Trim(), out double f_user, "f")) return;
        if (!TryParseDouble(txtHInput.Text.Trim(), out double h_user, "h")) return;

        // 1.2) Увеличиваем L на 14%:
        double L_target = L_user * 1.14;

        // 1.3) Ищем (N,α) в dtMerged1 для минимального |L – L_target|, начиная
с α=9 → 1:
        DataRow bestRow = null;
        int foundAlpha = 0;
        int N_val = 0;
        double eta = 0;
        foreach (int alpha in Enumerable.Range(1, 9).Reverse())
        {
```

```
            var rowsForAlpha = dtMerged1.AsEnumerable()
                .Where(r => r.Field<int>("α") == alpha);

            if (!rowsForAlpha.Any()) continue;
            var candidate = rowsForAlpha
                .OrderBy(r => Math.Abs(r.Field<double>("L") - L_target))
                .First();

            bestRow = candidate;
            foundAlpha = alpha;
            N_val = candidate.Field<int>("N");
            eta = candidate.Field<double>("Lp");
            break;
        }

        if (bestRow == null)
        {
            MessageBox.Show("Не удалось подобрать N и α для данного L.",
"Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
            return;
        }

        // 1.4) Высчитываем D и d (в см):
        double D = 0.02 * (1 + foundAlpha) * N_val;
        double d_inner = 0.4 * D;

        // 1.5) Поиск ρ₀ из dtLpByFh по (f_user, h_user):
        if (!TryFindRho0(f_user, h_user, out double rho0, out double matchedF, out
double matchedH)) return;
```

```
    // 1.6) Q = η·ω/ρ₀, где ω = 2π·(f_user/100) (т. е. f в ×10² МГц):
    double omega_simple = 2 * Math.PI * (f_user * 1000);
    // 1.6) Q = eta * omega_simple / rho0;
    double Q = eta * omega_simple / rho0;
    // 1.7) Увеличение Q на 15% — это и будет ИТОГОВАЯ добротность
    double Q_final = Q * 1.15;

    // 1.7) Собственная резонансная частота f₀:
    double f0_val = bestRow.Field<double>("F0");

    // 1.8) Записываем в результирующие метки:
    lblAlphaVal.Text = foundAlpha.ToString();
    lblNVal.Text = N_val.ToString();
    lblDVal.Text = D.ToString("F4");
    lbldVal.Text = d_inner.ToString("F4");
    lblEtaVal.Text = eta.ToString("F6");
    lblRho0Val.Text = rho0.ToString("F6");
    lblQVal.Text = Q_final.ToString("F3");
    lblF0Val.Text = f0_val.ToString("F3");
}

//
-----------------------------------------------------------------------

// 2. Второй алгоритм: «Минимальная занимаемая площадь»
//
-----------------------------------------------------------------------

private void RunSecondAlgorithm()
{
    // 2.1) Считываем L_user, f_user, h_user:
    if (!TryParseDouble(txtLInput.Text.Trim(), out double L_user, "L")) return;
```

```
        if (!TryParseDouble(txtFInput.Text.Trim(), out double f_user, "f")) return;
        if (!TryParseDouble(txtHInput.Text.Trim(), out double h_user, "h")) return;

        // 2.2) Без увеличения (L_target = L_user). Ищем минимальный α (от 1 до
9),
        //      где строка (N,α) даёт |L – L_user| минимальное. Берём N и η:
        DataRow bestRow = null;
        int foundAlpha = 0;
        int N_val = 0;
        double eta = 0;
        foreach (int alpha in Enumerable.Range(1, 9))
        {
           var rowsForAlpha = dtMerged1.AsEnumerable()
              .Where(r => r.Field<int>("α") == alpha);

           if (!rowsForAlpha.Any()) continue;
           var candidate = rowsForAlpha
              .OrderBy(r => Math.Abs(r.Field<double>("L") - L_user))
              .First();

           bestRow = candidate;
           foundAlpha = alpha;
           N_val = candidate.Field<int>("N");
           eta = candidate.Field<double>("Lp");
           break; // сразу берём минимальный α
        }

        if (bestRow == null)
        {
```

```
            MessageBox.Show("Не удалось подобрать N и α (с минимальным α) для данного L.", "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
            return;
        }

        // 2.3) D и d:
        double D = 0.02 * (1 + foundAlpha) * N_val;
        double d_inner = 0.4 * D;

        // 2.4) Поиск ρ₀ (из «Таблицы 3»):
        if (!TryFindRho0(f_user, h_user, out double rho0, out double matchedF, out double matchedH)) return;

        // 2.5) Q = η·ω/ρ₀:
        double omega_simple = 2 * Math.PI * (f_user * 1000);
        double Q = eta * omega_simple / rho0;

        // 2.6) f₀ = bestRow.Field<double>("F0"):
        double f0_val = bestRow.Field<double>("F0");

        // 2.7) Выводим:
        lblAlphaVal.Text = foundAlpha.ToString();
        lblNVal.Text = N_val.ToString();
        lblDVal.Text = D.ToString("F4");
        lbldVal.Text = d_inner.ToString("F4");
        lblEtaVal.Text = eta.ToString("F6");
        lblRho0Val.Text = rho0.ToString("F6");
        lblQVal.Text = Q.ToString("F3");
        lblF0Val.Text = f0_val.ToString("F3");
    }
```

```
//
//-----------------------------------------------------------------------

// 3. Третий алгоритм: «По заданным Q и L»
//
//-----------------------------------------------------------------------

private void RunThirdAlgorithm()
{
    // 3.1) Считываем L_user, f_user, h_user:
    if (!TryParseDouble(txtLInput.Text.Trim(), out double L_user, "L")) return;
    if (!TryParseDouble(txtFInput.Text.Trim(), out double f_user, "f")) return;
    if (!TryParseDouble(txtHInput.Text.Trim(), out double h_user, "h")) return;

    // 3.2) Считываем желаемую добротность Q_user:
    if (!TryParseDouble(txtQInput.Text.Trim(), out double Q_user, "Q")) return;

    // 3.3) Поиск ρ₀ из «Таблицы 3»:
    if (!TryFindRho0(f_user, h_user, out double rho0, out double matchedF, out
double matchedH)) return;

    // 3.4) Уменьшаем Q_user на 15% (т. е. Q_target = Q_user / 1.15):
    double Q_target = Q_user / 1.15;

    // 3.5) Рассчитываем η по формуле η = (Q_target·ρ₀) / ω,
    //      где ω = 2π·(f_user/100):
    double omega_simple = 2 * Math.PI * (f_user * 1000);
    double eta_target = (Q_target * rho0) / omega_simple;

    // 3.6) Увеличиваем L на 14%: L_target = L_user * 1.14:
    double L_target = L_user * 1.14;
```

```
        // 3.7) Ищем точку (N,α) в dtMerged1, где одновременно L ≈ L_target и Lp
≈ η_target, но только внутри одной α:
        DataRow bestRow = null;
        int foundAlpha = -1;
        int N_val = -1;
        double bestScore = double.MaxValue;

        foreach (int alpha in Enumerable.Range(1, 9))
        {
            var rowsForAlpha = dtMerged1.AsEnumerable()
                .Where(r => r.Field<int>("α") == alpha);

            foreach (var row in rowsForAlpha)
            {
                double L_table = row.Field<double>("L");
                double Lp_table = row.Field<double>("Lp");

                double deltaL = Math.Abs(L_table - L_target);
                double deltaEta = Math.Abs(Lp_table - eta_target);

                // Можно использовать сумму квадратов или просто сумму модуля:
                double score = Math.Sqrt(deltaL * deltaL + deltaEta * deltaEta);

                if (score < bestScore)
                {
                    bestScore = score;
                    bestRow = row;
                    foundAlpha = alpha;
                    N_val = row.Field<int>("N");
```

```
            }
        }
    }

    if (bestRow == null || bestScore > 0.01)
    {
        // Если bestScore очень большой, значит нет близкой точки
        // (т. е. L_target и η_target не пересекаются на одной α).
        MessageBox.Show(
            "Не удалось найти подходящую пару (N, α) для заданных L и Q.",
            "Ошибка расчёта",
            MessageBoxButtons.OK,
            MessageBoxIcon.Error
        );
        return;
    }

    // 3.8) D и d:
    double D = 0.02 * (1 + foundAlpha) * N_val;
    double d_inner = 0.4 * D;

    // 3.9) f₀ (×10² МГц) из bestRow:
    double f0_val = bestRow.Field<double>("F0");

    // 3.10) η и реальное Q для найденной (N,α) (можно показать, если нужно):
    double eta_found = bestRow.Field<double>("Lp");
    double Q_found = eta_found * omega_simple / rho0;

    // 3.11) Запись в метки:
```

```
            lblAlphaVal.Text = foundAlpha.ToString();
            lblNVal.Text = N_val.ToString();
            lblDVal.Text = D.ToString("F4");
            lbldVal.Text = d_inner.ToString("F4");
            lblEtaVal.Text = eta_found.ToString("F6");
            lblRho0Val.Text = rho0.ToString("F6");
            lblQVal.Text = Q_found.ToString("F3");
            lblF0Val.Text = f0_val.ToString("F3");
        }

        private bool TryParseDouble(string s, out double value, string fieldName)
        {
            value = 0;
            if (double.TryParse(s, NumberStyles.Any, CultureInfo.CurrentCulture, out
value))
                return true;
            if (double.TryParse(s, NumberStyles.Any, CultureInfo.InvariantCulture, out
value))
                return true;

            MessageBox.Show($"Некорректное значение {fieldName}. Введите
дробное число через запятую или точку.",
                            "Ошибка ввода", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Warning);
            return false;
        }

        /// По (f_user, h_user) ищем в dtLpByFh ближайшую строку по f и
ближайшее h ∈ {20,30,40}.
        /// Возвращаем ρ₀ и сами matchedF, matchedH (если нужно).
```

```
        private bool TryFindRho0(double f_user, double h_user,
                                 out double rho0, out double matchedF, out double matchedH)
        {
            rho0 = matchedF = matchedH = 0;

            // 1) выбираем ближайшее h из {20,30,40}
            double[] availableH = { 20, 30, 40 };
            matchedH = availableH.OrderBy(x => Math.Abs(x - h_user)).First();

            // 2) выбираем строку с ближайшим f:
            if (!dtLpByFh.Rows.Cast<DataRow>().Any())
            {
                MessageBox.Show("Таблица L/p по f и h пуста!", "Ошибка",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
                return false;
            }

            var bestFRow = dtLpByFh.AsEnumerable()
                .OrderBy(r => Math.Abs(r.Field<double>("f") - f_user))
                .FirstOrDefault();

            if (bestFRow == null)
            {
                MessageBox.Show("Не удалось найти подходящую частоту в
справочной таблице!", "Ошибка", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error);
                return false;
            }
```

```
            matchedF = bestFRow.Field<double>("f");

            // 3) в зависимости от matchedH вытаскиваем ρ₀ из соответствующей колонки
            if (Math.Abs(matchedH - 20) < 1e-6) rho0 = bestFRow.Field<double>("h20");
            else if (Math.Abs(matchedH - 30) < 1e-6) rho0 = bestFRow.Field<double>("h30");
            else rho0 = bestFRow.Field<double>("h40");

            return true;
        }
    }
}
```

MainForm.cs

```
using System;
using System.Data;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;

namespace ThinFilmCapacitorDesign
{
    public partial class MainForm : Form
    {
        private DataTable dtLpByFh;

        public MainForm()
        {
            InitializeComponent();
```

```
            dtLpByFh = TablesProvider.BuildLpByFhTable();


            btnCalcInductance.Click += BtnCalcInductance_Click;
            btnCalcCapacitor.Click += BtnCalcCapacitor_Click;
        }

        private void BtnCalcInductance_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            // Запускаем форму с полным алгоритмом индуктивности
            using (var form = new InductanceForm())
            {
                form.ShowDialog();
            }
        }

        private void BtnCalcCapacitor_Click(object sender, EventArgs e)
        {

            using (var form = new Form1())
            {
                form.ShowDialog();
            }
        }

    }
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»

Ректору Пензенского
государственного университета
А.Д. Гулякову
студента 2 курса ФИТЭ
очной формы обучения
Малышева Сергея Алексеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Малышев Сергей Алексеевич, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04. Электроника и наноэлектроника, магистерская программа «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему «Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

10.06.2025г

ВКР представлена на проверку 10.06.2025

Руководитель ВКР _____ А.Н. Головяшкин

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов» студента 2 курса С.А. Малышева направления подготовки 11.04.04. Электроника и наноэлектроника, магистерская программа «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР А.Н. Головяшкин

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы:	Малышев Сергей Алексеевич
Самоцитирование рассчитано для:	Малышев Сергей Алексеевич
Название работы:	Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов
Тип работы:	Магистерская диссертация
Подразделение:	Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ВНИМАНИЕ, ДОКУМЕНТ ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЙ:** ОБНАРУЖЕНЫ ПОПЫТКИ МАСКИРОВКИ ЗАИМСТВОВАНИЙ. РЕКОМЕНДУЕТСЯ ПРОВЕРИТЬ ПОЛНЫЙ ОТЧЕТ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	25.65%	СОВПАДЕНИЯ	2.6%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	74.35%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	74.35%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	23.05%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2025 **ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ:** 10.06.2025 13:26

Структура документа:	Проверенные разделы: основная часть с.3, 5-36, 39-66, титульный лист с.1, содержание с.2, введение с.3-5, выводы с.36-39
Модули поиска:	Интернет Плюс; Диссертации НББ; Переводные заимствования; Цитирование; ИПС Адилет; Патенты СССР, РФ, СНГ; СМИ России и СНГ; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Коллекция НБУ; Шаблонные фразы; IEEE; Медицина; Публикации eLIBRARY; Сводная коллекция ЭБС; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации РГБ; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

10.06.2025 А.Н. Головяшкин

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Малышев Сергей Алексеевич
Самоцитирование рассчитано для: Малышев Сергей Алексеевич
Название работы: Разработка методики и программного обеспечения для проектирования высокоточных тонкопленочных конденсаторов
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ВНИМАНИЕ, ДОКУМЕНТ ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЙ:** ОБНАРУЖЕНЫ ПОПЫТКИ МАСКИРОВКИ ЗАИМСТВОВАНИЙ. РЕКОМЕНДУЕТСЯ ПРОВЕРИТЬ ПОЛНЫЙ ОТЧЕТ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	25.65%	СОВПАДЕНИЯ	2.6%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	74.35%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	74.35%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	23.05%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 10.06.2025 13:26

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.3, 5-36, 39-66, титульный лист с.1, содержание с.2, введение с.3-5, выводы с.36-39
Модули поиска: Интернет Плюс; Диссертации НББ; Переводные заимствования; Цитирование; ИПС Адилет; Патенты СССР, РФ, СНГ; СМИ России и СНГ; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Коллекция НБУ; Шаблонные фразы; IEEE; Медицина; Публикации eLIBRARY; Сводная коллекция ЭБС; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации РГБ; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 10.06.2025

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Презентация ВКР

ТЕМА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ: РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Выполнил: студент группы 23ПДм1 Малышев С.А.
Руководитель: Зам. заведующего кафедрой НиМЭ, ПГУ Головяшкин А.Н.

Цель и задачи исследования

- Цель: разработать методику расчёта параметров тонкоплёночных конденсаторов, предусматривающую дискретную подгонку готовой конструкции, и реализовать её в виде прикладного программного обеспечения. Кроме того, была поставлена задача объединить в едином пакете алгоритмы расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных элементов с учётом требований к добротности, резонансной частоте и занимаемой площади.
- Задачи:

1. Анализ существующих алгоритмов расчёта тонкоплёночных конденсаторов: классических аналитических моделей, численных методов (FEM, FDM), методов машинного обучения и эмпирических моделей.
2. Разработка универсального алгоритма расчёта тонкоплёночных конденсаторов с учётом технологической погрешности, температурной стабильности, старения плёнок и возможности дискретной подгонки по конечным секциям.
3. Построение методики расчёта топологии тонкоплёночных индуктивных спиралей, обеспечивающей максимальную добротность при заданных параметрах или минимальную занимаемую площадь при заданном номинале индуктивности.
4. Реализация программного обеспечения, включающего указанные алгоритмы, и проверка корректности вычислений на примерах.

Анализ существующих алгоритмов

Аналитические модели

Плюсы:

- Мгновенный результат
- Простая формула
- Минимум вычислений

Минусы:

- Применимо лишь к простым формам (плоская пластина, зазор)
- Игнорирует краевые эффекты
- Погрешность до 20 %

Машинное обучение (ML)

Плюсы:

- Автоматически ловит сложные зависимости
- Быстрый вывод после обучения
- Адаптация под конкретные данные

Минусы:

- Долго учится (нужен большой датасет)
- «Чёрный ящик» — сложно объяснить результаты
- Может переобучаться

Метод конечных элементов (FEM)

Плюсы:

- Высочайшая точность
- Учитывает любую геометрию
- Выявляет локальные «горячие точки» поля

Минусы:

- Длительный расчёт (от минут до часов)
- Большие требования к памяти и CPU
- Настройка сетки требует опыта

Эмпирические формулы

Плюсы:

- Сверхбыстрый расчёт (мс–с)
- Лёгкая реализация
- Усреднённая надёжность (90–95 %)
- Малая нагрузка на ресурсы ПК

Минусы:

- Жертва точностью (5–10 %)

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора

Расчет допустимой погрешности площади конденсатора с требуемой точностью:

$$\gamma_{S\text{доп}} = \Delta\text{Стреб} - \gamma c_0 - \gamma_{Ct} - \gamma c_{\text{ст}} \cdot 100\%,$$

где $\gamma_{Ct} = \text{ТК}C \cdot (T_{max} - 20°\text{C}) \cdot 100\%$

Номинал на изготовление $C_{\text{изг}}$:

$$C_{min} = C_{\text{изг}} - \Delta C_{max} = C_{\text{исх}},$$

где $\Delta C_{max} = C_{\text{изг}} \cdot \Delta C_{\text{техн}}$

Номинал при максимально допустимой точности по формуле:

$$C_{max} = C_{\text{изг}} + \Delta C_{max}$$

Шаг подгонки:

$$\Delta C = C_{max} - C_{\text{исх}}$$

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора

Число подстраиваемых секций:

$n = \Delta C / C_{0min}$,

где $C_{0min} = C_0 S_{min}$

Минимальный номинал для изготовления конденсатора:

$C_{треб} = C_{исх} + \Delta C_{треб}$

Емкость одной секции:

$$C_c = \frac{C_{0min} \cdot n_{max}}{n}$$

Толщина диэлектрика:

$$d = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{C_0}$$

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора

Определение удельной емкости:

$$C_{0V} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{d}$$

для обеспечения необходимой электрической прочности

$$C_{0\min}{}' = \frac{C_{\text{исх}}}{3(2n-1)}$$

обусловленной ограничением минимальной площади

Минимальное и максимальное значение C_0 :

$$C_0^{\min} = C_0\left(1 - \frac{\gamma_{C0}}{100\%}\right)$$

$$C_0^{\max} = C_0\left(1 + \frac{\gamma_{C_0}}{100\%}\right)$$

Расчет коэффициента, учитывающего краевой эффект:

$$K = \begin{cases} 1; C / C_0 \geq 5 \text{ мм}^2 \\ 1{,}3 - 0{,}06 \cdot C / C_0; 1 \leq C / C_0 < 5 \text{ мм}^2 \end{cases}$$

Площадь верхней обкладки вместе с подгоночными секциями:

$$S_{\max} = \frac{C_{\min}}{C_0^{\min}}$$

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночного конденсатора

Площадь одной секции конденсатора сложной формы: $S_C = \frac{C_C}{C_0^{\max}}$

Площадь основной обкладки нерегулируемой части конденсатора: $S_{\text{осн}} = S_{\max} - n \cdot S_c$

Размеры сторон верхней обкладки конденсатора:

$$L_1 = \sqrt{(\frac{\Delta L}{2})^2 \cdot (1 + K_{\phi})^2 + S_{\text{осн}} \cdot K_{\text{ф}}} - \frac{\Delta L}{2}(1 + K_{\text{ф}})$$

$$B_1 = \sqrt{(\frac{\Delta L}{2})^2 \cdot \frac{(1 + K_{\phi})^2}{K_{\phi}^2} + \frac{S_{\text{осн}}}{K_{\text{ф}}}} - \frac{\Delta L}{2}(1 + K_{\text{ф}})$$

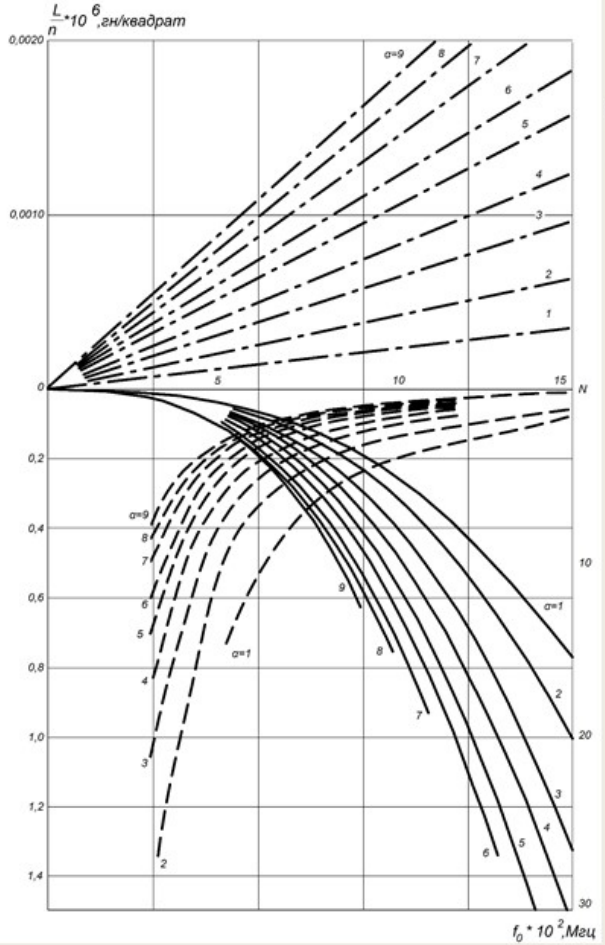
Размер секции: $L_c = B_c = \sqrt{S_c}$

Размер нижней обкладки подгоняемого конденсатора: $L_{\text{Н}} = B_{\text{Н}} = L_1 + L_c \cdot 2/m$, где $m = \begin{cases} 1; n \geq 5 \\ 2; n < 5 \end{cases}$

Определение размеров диэлектрика: $L_{\text{Д}} = B_{\text{Д}} = L_{\text{Н}} + 2f$

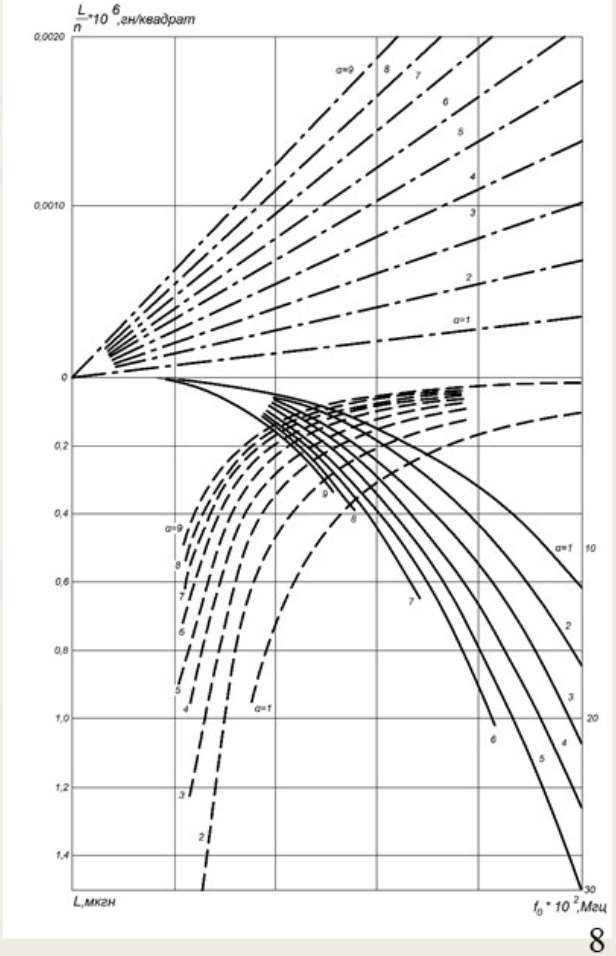
Площадь, занимаемая конденсатором: $\text{S}_{\text{Д}} = L_{\text{Д}} \cdot B_{\text{Д}}$

Расчёт тонкоплёночных индуктивных элементов



<= Рисунок 1 – Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра $\eta=L/n$ (штрих-пунктирные) круглой спирали от числа витков N при различных значениях α.

Рисунок 2 –Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра $\eta=L/n$ (штрих-пунктирные) квадратной спирали от числа витков при различных значениях α.



Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов

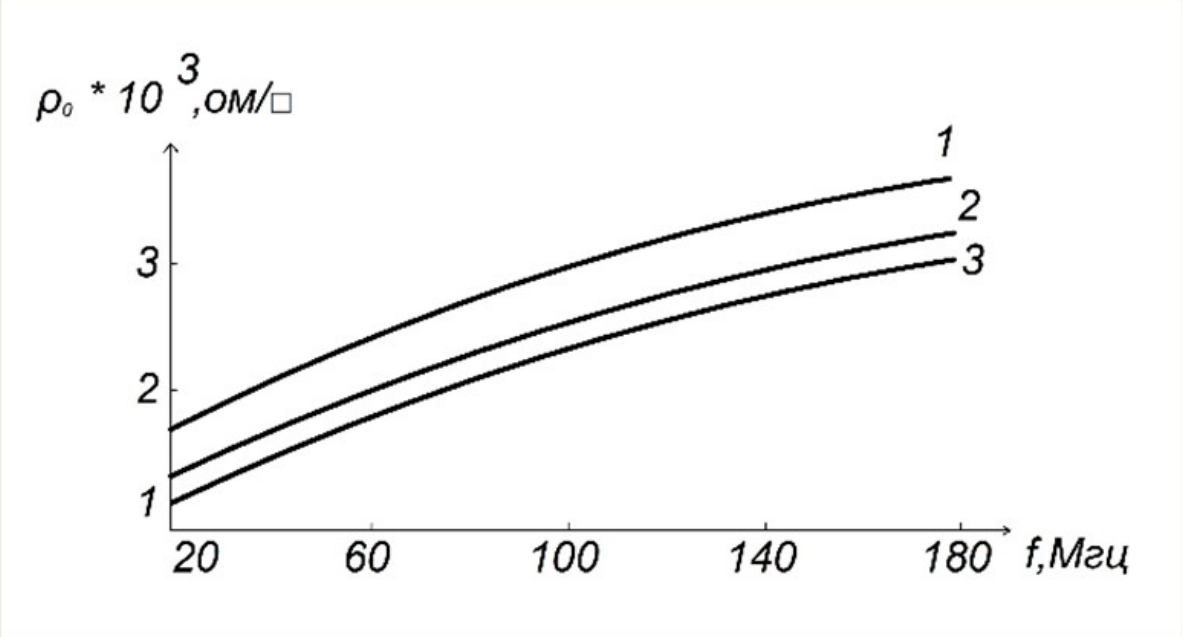


Рисунок 3 – Зависимость удельного поверхностного сопротивления токопровода от частоты и толщины. *h*=20; 30; 40 мкм (кривые 1-3).

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов

Расчет топологии индуктивности с максимально возможной добротностью:

– заданное значение индуктивности увеличивают на 14%;

– по номограммам рисунка 1 определяют число витков спирали, соответствующее полученному ранее значению индуктивности для максимального значения α;

– определяют величину внешнего диаметра спирали по формуле

$$D = 0{,}02\,(1+\alpha)\,N\ (\text{см});$$

– из уравнения определяют внутренний диаметр спирали d;

$$\left(\frac{d}{D}\right)_{\text{опт}} = 0{,}4,$$

– по полученным α и N (рисунок 1) определяют значение параметра η;

– по заданной рабочей частоте определяют (рисунок 3) значение удельного поверхностного сопротивления;

– по формуле рассчитывается добротность спирали;

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)}$$

– расчетное значение добротности увеличивается на 15%;

– по номограммам, приведенным на рисунке 1, определяют собственную резонансную частоту индуктивности.

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов

Расчет топологии индуктивности на минимальной занимаемой площади:

– по номограммам из рисунка 2 для заданного значения индуктивности и минимального α определяют число витков спирали и значение η;

– по заданной рабочей частоте определяют из рисунка 3 значение удельного сопротивления;

– рассчитывают добротность индуктивности;

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)}$$

– определяют частоту собственного резонанса спирали из рисунка 2.

Алгоритм расчёта параметров тонкоплёночных индуктивных элементов

Расчет топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности:

– определяют значение удельного сопротивления из рисунка 3;

– заданное значение добротности уменьшают на 15%;

– по формуле рассчитывают значение параметра η по ρ_0 и Q;

$$Q = \frac{\eta\omega}{\rho_0(\omega)}$$

– полученное значение η откладывают по оси ординат на рисунке 1 и проводят горизонтальную линию;

– увеличивают заданное значение индуктивности на 14% и откладывают его на оси ординат рисунка 1; проводят горизонтальную линию;

– передвигая линейку параллельно оси ординат, определяют число витков спирали. Пересечение линейки должно находиться на кривых с одинаковым значением параметра α;

– определяют значения внутреннего и внешнего диаметров;

$$D = 0{,}02\ (1+\alpha)\ N\ (\text{см})$$

– из рисунка 1 находят частоту собственного резонанса индуктивности.

Организация производственной безопасности при вакуумном напылении

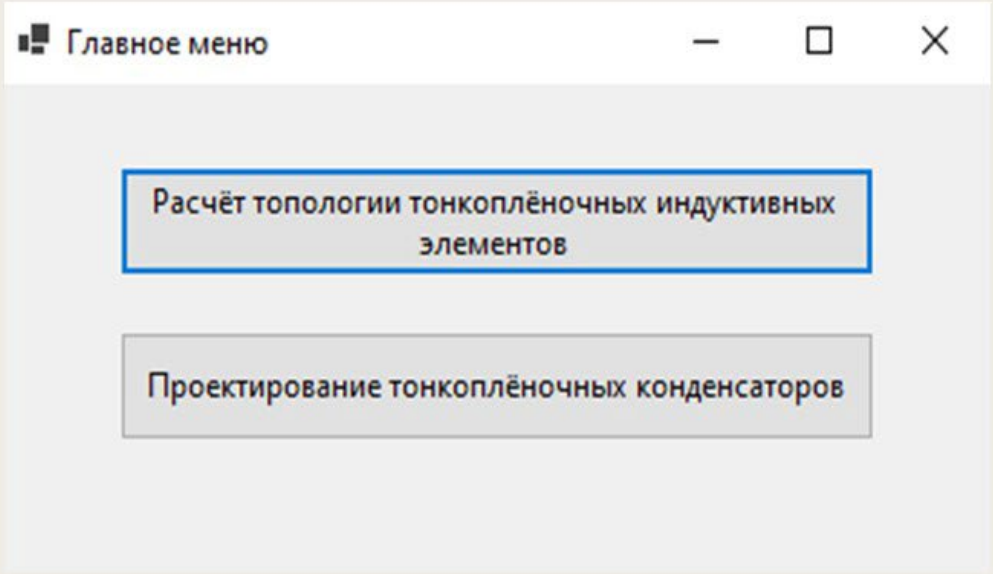
Обучение персонала: стандарты, инструктаж перед работой

Средства индивидуальной защиты: перчатки, очки, респиратор, антистатический халат

Проверка оборудования: герметичность камеры, уровень масла в насосе, исправность манометров

Вентиляция и отведение газов: локальные вытяжки, датчики утечки

Работа с материалами: хранение и перекачка порошков/пеллет, маркировка баллонов

Аварийные процедуры: кнопка «стоп», план эвакуации, первая помощь

Перейдём к программе