

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Кафедра «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к выпускной квалификационной работе бакалавра

на тему «Проектирование элементов с фрактальным импедансом на основе резистивно-емкостных элементов со структурой слоев вида C-R-NC»

Студент гр. Б08-071-1

Руководитель, д.т.н., профессор

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

И.В. Князев

П.А. Ушаков

В.А. Глушков

Ижевск 2020

Список условных обозначений и сокращений

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ГПИ – графический пользовательский интерфейс;

ДИД – дробное интегрирование/дифференцирование;

КД – конструкторская документация;

УГО – условные графические обозначения;

ФИ – фрактальный импеданс;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭРП – элементы с распределенными параметрами;

ЭФИ – элементы с фрактальным импедансом.

Оглавление

Список условных обозначений и сокращений.....	2
Введение.....	4
ГЛАВА 1 Обоснование необходимости реализации проекта.....	5
ГЛАВА 2 Описание математической модели.....	10
2.1 Постановка задачи анализа ЭФИ на основе многослойной резистивно-емкостной среды C-R-NC структуры.....	10
2.2 Основные уравнения многополюсника в форме y-параметров.....	13
2.3 Метод многополюсных подсхем.....	15
2.4 Преобразование матрицы y-параметров в матрицу z-параметров.....	18
2.5 Разработка алгоритма и программы анализа ЭФИ на основе y-параметров.....	19
2.5.1 Генерирование вариантов схем включения четырехполюсников.....	19
2.5.2 Блок-схема программы анализа.....	20
ГЛАВА 3 Разработка программы синтеза ЭФИ в среде MATLAB.....	22
3.1 Разработка программы отбора вариантов схем включения C-R-NC ЭРП, удовлетворяющих заданным требованиям.....	22
3.2 Разработка программы оптимизации параметров C-R-NC ЭРП N и L.....	23
3.3 Проверка адекватности результатов программы синтеза на основе C-R-NC ЭРП.....	25
3.4 Разработка интерфейса программы.....	27
ГЛАВА 4 Разработка конструкции ЭФИ на основе RC-ЭРП со структурой слоев вида C-R-NC.....	29
Заключение.....	33
Список использованных источников.....	34
Приложение А	
Приложение Б	

Введение

Теория фракталов совместно с теорией дробных операторов интегрирования/дифференцирования и фрактальная трактовка самых разнообразных задач, возникающих в различных областях науки и техники, не обошли стороной и современную радиотехнику. Появившиеся термины «фрактальная радиофизика», «фрактальная радиолокация», «фрактальная радиоэлектроника» отражают принципиально иной подход к представлению составляющих электрических сигналов и электромагнитного поля.

Во многих практических задачах, когда их математическая формулировка вызывает затруднение или не требуется их аналитическое решение, а необходимо знать лишь реакцию динамической системы на некоторое входное воздействие, широко используется аналоговое схемотехническое моделирование. Однако в случае систем дробного порядка его реализация требует наличия специфических двухполюсных пассивных элементов, в которых связь между током и напряжением описывается дифференциальным уравнением дробного порядка. Показано, что в таких элементах импеданс зависит от частоты не в целой степени, как у обычных емкостных или индуктивных элементов, а в дробной степени α ($0 < \alpha < 1$). Поэтому такие элементы в работе мы назвали элементами с фрактальным импедансом (ЭФИ).

Достаточно полный обзор конструктивно-технологических вариантов ЭФИ, существующих в настоящее время, их основные характеристики и области применения с некоторыми примерами приведены в [1].

Практическое изготовление образцов ЭФИ со структурой слоев R-C-NR (резистивный слой R, диэлектрик C, резистивный слой NR) и применение их для создания фрактальных функциональных устройств радиоэлектроники вскрыло некоторые недостатки таких элементов. На наш взгляд, устранить или существенно уменьшить проявление этих недостатков можно использованием для синтеза ЭФИ RC-ЭРП с другой структурой слоев, а именно, со структурой слоев вида 0-C-R-NC-0 (обкладка, диэлектрик C, резистор R, диэлектрик NC, обкладка). В дальнейшем, для простоты будет называть этот вид слоев C-R-NC.

Однако, проблема состоит в том, что при замене в синтезированном ЭФИ R-C-NR ЭРП на C-R-NC ЭРП фрактальные свойства получившегося двухполюсника теряются. Поэтому для синтеза ЭФИ на основе C-R-NC ЭРП, требуется разработка другой программы синтеза, что и является целью данной работы.

ГЛАВА 1 Обоснование необходимости реализации проекта

В настоящее время невозможно представить себе электрические и радиоэлектронные устройства без таких пассивных элементов как резисторы (R), конденсаторы (C) и катушки индуктивности (L). Наличие этих элементов позволило создать современные средства связи, системы радиовещания и телевидения, вычислительную технику, которые являются основой современных информационных технологий, определяют научно-технический прогресс.

В научных исследованиях широко применяется аналоговое моделирование. Оно основано на том, что дифференциальные уравнения, описывающие динамические процессы в электрических цепях, подобны дифференциальным уравнениям, которые описывают динамические процессы в механике, физике твердого тела, в теплотехнике, гидравлике и в других системах распределенной природы.

Современные R-, C- и L-элементы, прошли долгий путь развития, начиная с первых опытов с электричеством. Многие тысячи ученых, конструкторов, технологов во всех странах занимались совершенствованием этих элементов. И этот процесс не прекращается и в настоящее время.

Обобщая результаты многочисленных теоретических (математических) и экспериментальных исследований, начало которым было положено еще в конце XVII-го века, Б. Мандельброт опубликовал пионерскую работу о фрактальной геометрии природы [2]. Эта работа произвела революционные изменения во взглядах ученых на структуру и свойства природных объектов. Для описания характеристик и свойств объектов в соответствии с их фрактальной природой потребовался новый математический аппарат - дробные исчисления [3].

Вот далеко неполный перечень задач, в которых появляются и оказываются эффективными уравнения с дробными производными:

- классическая механика (обратные задачи);
- гидродинамика (движение тела в вязкой жидкости);
- теплопроводность (динамика тепловых потоков);
- диффузия (электрохимический анализ поверхностей электродов);
- динамика турбулентной среды;
- теория фазовых переходов;
- просачивание в пористых жидкостях;
- вязкоупругость (реология полимеров);
- недебаевская релаксация в диэлектриках;

- аномальный перенос заряда в неупорядоченных полупроводниках;
- статическая оптика;
- радиофизика и радиотехника;
- теория управления динамических систем;
- резонансное излучение и диффузионные процессы в плазме;
- динамический хаос;
- геология (землетрясение) и др.

Обширная библиография по этим вопросам дана в работах российских ученых Потапова А.А. [4] и Учайкина В.В. [5].

Во всех этих областях для исследования поведения систем широко применяется аналоговое моделирование, используя схемотехнические модели, отражающие динамику процессов, происходящих в реальных объектах. Однако, как показали многочисленные исследования, динамика реальных объектов более точно описывается дифференциальными уравнениями дробного порядка [6]. Поэтому аналоговые модели таких объектов, составленные только из R-, C- и L-элементов не отражают истинную природу исследуемых объектов, характеризующихся дробной динамикой. По этой причине в середине XX века для моделирования кинетики электрохимических процессов в аналоговые модели стали вводить так называемые элементы Варбурга – эквивалентные элементы электрической цепи. Элементы Варбурга моделируют диффузионные процессы и характеризуются зависимостью импеданса от частоты в степени 0,5 [7]. В общем случае элементы, имеющие дробно-степенную зависимость импеданса от частоты вида $Z_F^i = \left(1/\omega^\alpha C_\alpha\right) e^{-j\alpha\pi/2}$, где ω – круговая частота, $0 < \alpha < 1$, C_α – константа, имеющая смысл фрактальной емкости, получили название «элементы с постоянной фазой (constant phase elements - CPE)» или элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ).

Наличие ЭФИ позволяет выполнять аналоговые операции дробного интегрирования и дифференцирования, которые, по аналогии с интегрированием и дифференцированием целого порядка, могли бы существенно расширить возможности анализа сигналов, формируемых как объектами живой, так и неживой природы (как правило, фрактальных). Кроме того, в аналоговых системах управления, в которых широко используются дифференцирующие и интегрирующие звенья и частотно-избирательные фильтры в цепях прямой и обратной передачи, звенья с дробным порядком интегрирования и дифференцирования позволяют создавать более робастные системы управления, адаптирующиеся к изменениям свойств объекта управления и к внешним помехам в режиме реального времени.

Несмотря на необходимость применения элементов с постоянной фазой в аналоговых моделях, в системах управления и в системах идентификации параметров объектов, характеризующихся дробной динамикой, такая элементная база, которая бы де факто пополнила набор классических пассивных элементов, до сих пор не создана.

Первые официальные попытки создания таких элементов и их использования в электронных устройствах можно отнести к пионерским работам казанской школы электрохимических преобразователей [8]. ЭФИ были созданы на основе электрохимических диодов. Но, с появлением интегральных микросхем, такие ЭФИ не могли быть встроены в эти схемы как из-за габаритов, так и из-за совершенно несовместимых технологий изготовления. Поэтому в работе [9] был предложен метод синтеза двухполюсника, имеющего импеданс с постоянной фазой в ограниченном диапазоне частот в виде лестничной многозвенной цепи (*рисунок 1.1*), состоящей из обычных R- и C-элементов. Этот способ создания ЭФИ нашел широкое применение в экспериментальных исследованиях, при которых не требовалось создавать промышленно тиражируемые изделия.

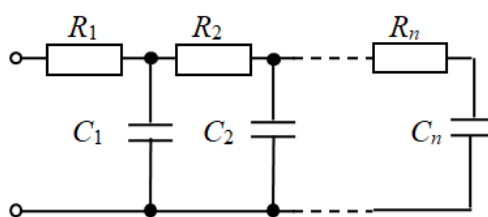


Рисунок 1.1. Лестничная цепь, RC-цепь

Однако как основа для создания коммерческих ЭФИ такой подход имеет ряд недостатков. Во-первых, потому что это не элемент, а сборочный узел (*рисунок 1.2*), не обладающий компактностью, надежностью и низкой стоимостью отдельного элемента (как резистора или конденсатора). Во-вторых, для получения постоянства фазы импеданса в определенном диапазоне частот требовалось большое число (несколько десятков) дискретных элементов с номиналами, отличающимися на два-три порядка, и с точностью, превышающей точности номиналов стандартных резисторов и конденсаторов.



Рисунок 1.2. Конструкция ЭФИ на основе RC-элементов для аппроксимирующей функции импеданса 20-го порядка

В настоящее время разрабатываются и другие конструктивно-технологические варианты ЭФИ. Они построены на использовании электрохимических процессов, на некоторых свойствах композиционных материалов, на использовании RC-структур, имеющих топологию геометрических фракталов [10 - 14]. Все это говорит о потребности в разработке ЭФИ в виде отдельного (дискретного) элемента с теми же конструктивно-технологическими возможностями, которые обеспечивают обычные резисторы и конденсаторы (габариты, технологии, совместимые с изготовлением интегральных схем, точность параметров, возможность подгонки, стоимость, наличие стандартных рядов параметров и характеристик и т.п.).

Наиболее близко отвечают всем этим требованиям ЭФИ на основе многослойной резистивно-емкостной среды, впервые предложенные в работах [15, 16]. Варианты конструкций такой многослойной резистивно-емкостной среды представлены на *рисунке 1.3*.

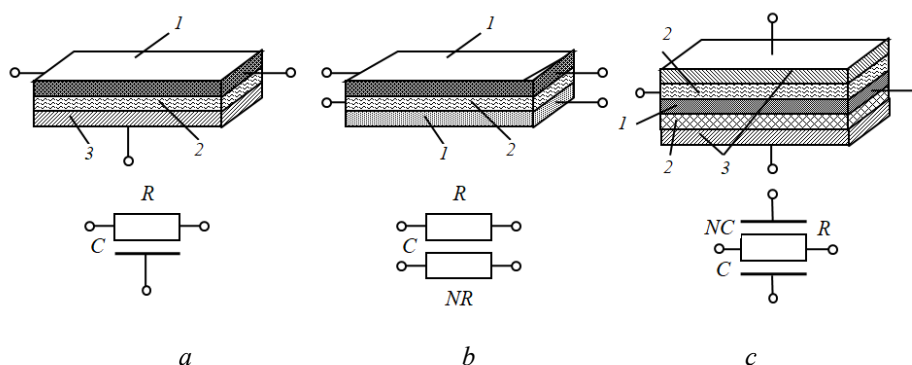


Рисунок 1.3. Варианты RC-ЭФИ со структурами слоев вида: *a* – R-C-0; *b*-R1-C-R2; *c*-C1-R-C2 (*1* – резистивные слои, *2* – диэлектрические слои, *3* – проводящие обкладки)

В настоящее время изготовлены образцы толсто пленочных ЭФИ на основе R-C-NR ЭФИ (вариант *б*). Однако практическое изготовление образцов ЭФИ на основе многослойной резистивно-емкостной среды и применение их для создания фрактальных функциональных устройств радиоэлектроники вскрыло некоторые недостатки таких элементов. Во-первых, при автоматизированном синтезе схемы коммутации входящих в ЭФИ R-C-NR ЭФИ с высокой долей вероятности образуются фрактальные конденсаторы с гальванической связью между выводами. Это в ряде схем может нарушать режим работы активных элементов по постоянному току. Поэтому для работы схемы требуется вводить дополнительные разделительные конденсаторы большой емкости. Во-вторых, при изготовлении элементов по толсто пленочной или полупроводниковой технологии практически невозможно выполнить требуемый номинал нижнего резистивного слоя из-за того, что при формировании диэлектрика и верхнего резистивного слоя используются

высокотемпературные операции. Вследствие этого многократное температурное воздействие на нижний резистивный слой вызывает существенное изменение удельного сопротивления слоя, имеющего многокомпонентный состав, и приводит к изменению требуемого коэффициента N .

На наш взгляд, устранить или существенно уменьшить проявление этих недостатков можно использованием для синтеза ЭФИ RC-ЭРП с другой структурой слоев, а именно, со структурой слоев вида C-R-NC. Эта гипотеза основывается на следующих обстоятельствах.

1. Преимущественное количество диэлектрических слоев в многозвенной цепи, состоящей из ЭРП вида C-R-NC, с высокой долей вероятности будет приводить к ЭФИ без гальванической связи между выводами, что точнее отражает название элемента – фрактальный конденсатор.

2. В данной конструкции важно обеспечить точное соотношение удельных емкостей диэлектрических слоев, определяемых коэффициентом N . Поэтому изменение номинала резистивного слоя не будет критичным для получения заданного коэффициента α .

3. Математические модели, в качестве которых для RC-ЭРП используются матрицы y -параметров длинных RC-линий, в одном случае для R-C-NR-линии, а в другом случае для C-R-NC-линии, являются дуальными.

Однако, при замене в синтезированном ЭФИ R-C-NRЭРП на C-R-NC ЭРП фрактальные свойства получившегося двухполюсника теряются. Поэтому для синтеза ЭФИ на основе C-R-NC ЭРП, требуется разработка другой программы синтеза.

Целью данной работы является исследование возможности создания ЭФИ на основе RC-ЭРП со структурой слоев вида C-R-NC.

Для достижение поставлено цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка программы анализа ЭФИ на основе y -параметров RC-ЭРП со структурой слоев C-R-NC и оценка возможности получения ЭФИ;
2. Разработка программы синтеза;
3. Разработка методики проектирования конструкции ЭФИ.

При этом, необходимо учесть, что постоянство фаз импеданса должно быть не менее одной частотной декады, а так как C-R-NC ЭРП является преимущественно емкостным элементом, то уровень постоянства фазы импеданса должно находиться в пределах от -45 до -90 градусов.

ГЛАВА 2 Описание математической модели

2.1 Постановка задачи анализа ЭФИ на основе многослойной резистивно-емкостной среды C-R-NC структуры

Очевидно, что алгоритм программы анализа будет являться фундаментом для алгоритма синтеза (поиска схем коммутаций), и оптимизации параметров C-R-NC ЭФИ.

Для того что бы упростить программу синтеза, предположим, что существуют фрактальные элементы на двух C-R-NC структурах. Перед тем как начать поиск схем включения, необходим математический аппарат для анализа ЭФИ, так как анализ электронных схем на ЭВМ осуществляется с помощью математической модели, т.е. системы уравнений, описывающей работу исследуемой схемы.

Как правило, в реальных конструкциях RC-ЭРП толщины слоев на несколько порядков меньше длины и ширины элемента. Поэтому для анализа эти элементы считаются двумерными. Но, в частном случае, когда удельные параметры слоев не зависят от координат в плоскости слоев, а контакты к резистивным слоям расположены так, как показано на *рисунке 1.3*, и образуют контакты по всей ширине резистивных слоев, то для анализа эти RC-ЭРП можно считать одномерными. Тогда в качестве математических моделей таких элементов можно использовать длинные RC-линии с соответствующей структурой слоев.

Конструкция C-R-NC ЭРП представлена на *рисунке 1.3, с*, а его условное графическое изображение (УГО) с нумерацией выводов, представлено на *рисунке 2.1*.

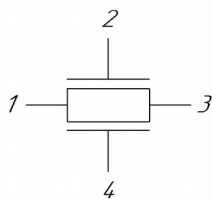


Рисунок 2.1. УГО C-R-NC ЭРП

Так как C-R-NC ЭРП является многополюсным элементом, то для его анализа можно воспользоваться параметрами проводимости, то есть идеализированными у-параметрами этого элемента. В данном случае, матрица у-параметров должна иметь размерность 4x4, так как мы рассматриваем четырехполюсник. Следовательно, матрица проводимостей в общем виде будет иметь вид:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

В соответствии с [17] матрица у-параметров для С-R-NC структуры преобразуется к виду:

$$Y = \frac{j\omega C}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{(N+1)}{th\theta} & -th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{-(N+1)}{sh\theta} & -N \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{1}{N+1} \left(N\theta + 2 \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) & -th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{-N}{N+1} \left(\theta - 2 \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \\ \frac{-(N+1)}{sh\theta} & -th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{(N+1)}{th\theta} & -N \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -N \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{-N}{N+1} \left(\theta - 2 \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) & -N \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) & \frac{N}{N+1} \left(\theta + 2 \cdot N \cdot th\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

, где $\theta = \sqrt{j\omega RC(N+1)}$ - постоянная распространения линии, C – полная емкость первого диэлектрического слоя, R – полное сопротивление резистивного слоя, N – соотношение удельных емкостей второго и первого диэлектрических слоев.

В дальнейшем, для проверки результатов работы программ анализа и синтеза, будем использовать схемотехническое моделирование в программе OrCAD. С этой целью была разработана схемотехническая модель С-R-NC ЭРП в виде 512-звенных лестничных цепей (рисунок 2.2), содержащих R- и C- элементы с сосредоточенными параметрами.

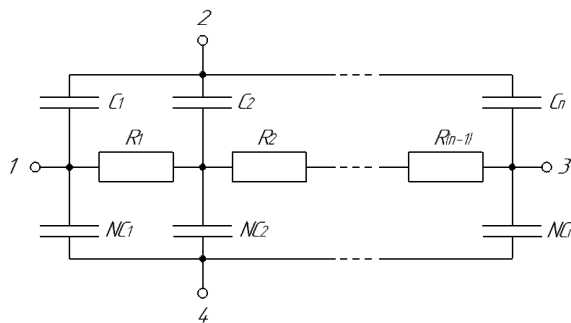


Рисунок 2.2. Лестничная цепь замещения С-R-NC структуры

Убедимся, что разработанная схемотехническая модель действительно аппроксимирует свойства С-R-NC ЭРП в широком диапазоне частот. Для этого сравним графики частотных характеристик некоторых у-параметров, вычисленных на основе (2.2), с аналогичными у-параметрами, полученными в программе OrCAD. Моделировать будем

ячейки под номерами: Y_{12} , Y_{24} и Y_{43} . Результаты сравнения приведены попарно на *рисунках* 2.3 – 2.8.

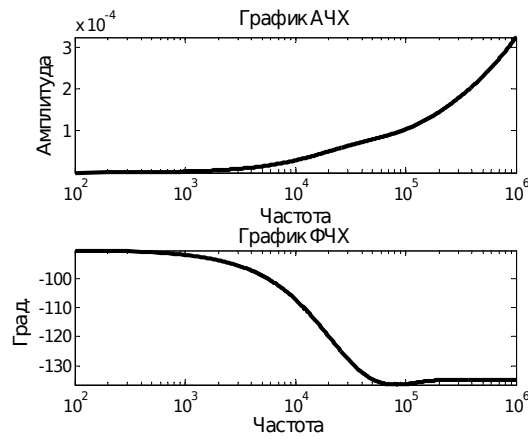


Рисунок 2.3. Графики АЧХ и ФЧХ в программе MATLAB для ячейки Y_{12}

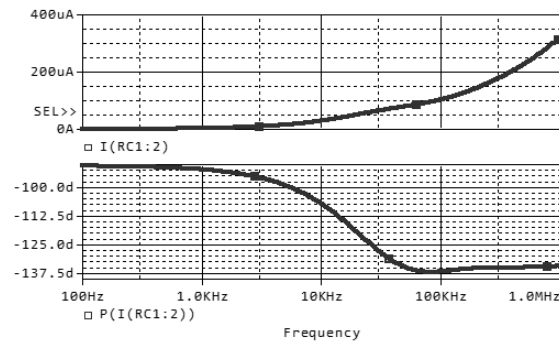


Рисунок 2.4. Графики АЧХ и ФЧХ в программе OrCAD для ячейки Y_{12}

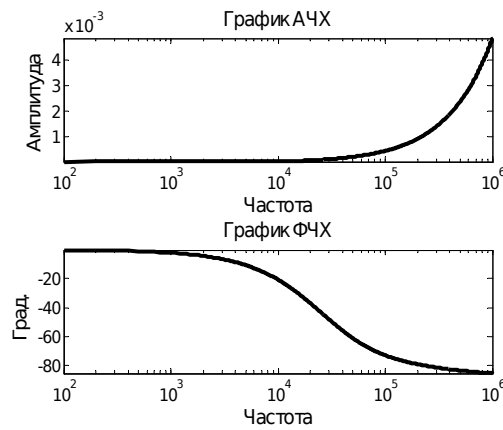


Рисунок 2.5. Графики АЧХ и ФЧХ в программе MATLAB для ячейки Y_{24}

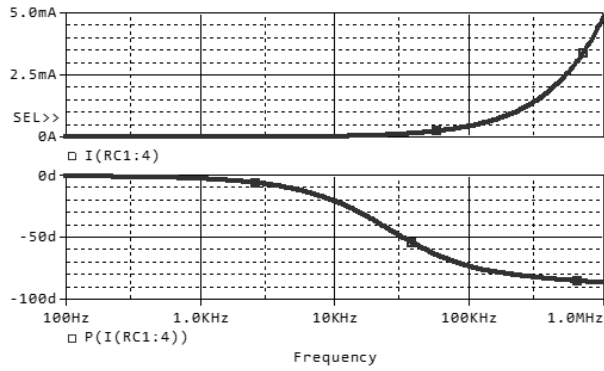


Рисунок 2.6. Графики АЧХ и ФЧХ в программе OrCAD для ячейки Y_{24}

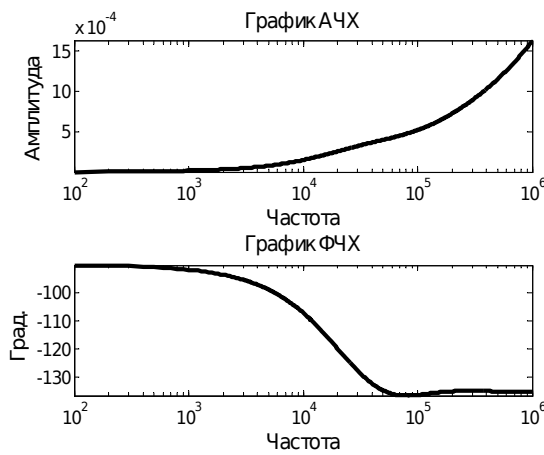


Рисунок 2.7. Графики АЧХ и ФЧХ в программе MATLAB для ячейки Y_{43}

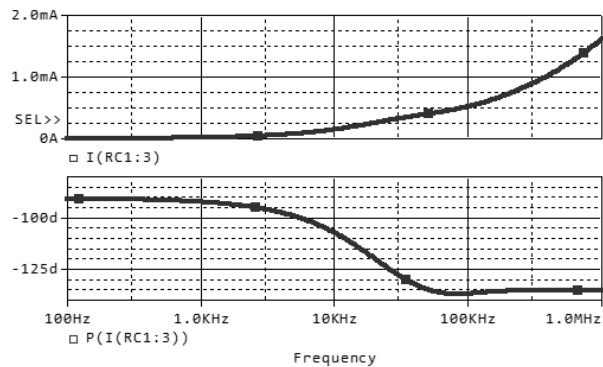


Рисунок 2.8. Графики АЧХ и ФЧХ в программе OrCAD для ячейки Y_{43}

Если сравнить графики АЧХ и ФЧХ для Y_{12} на рисунках 2.3 и 2.4, для Y_{24} на рисунках 2.5 и 2.6, для Y_{43} на рисунках 2.7 и 2.8, то можно заметить, что результаты моделирования в программе MATLAB, на основе математической модели, и в программе OrCAD, на основе лестничных цепей, одинаковы. В результате, проверка в двух программах полностью подтвердила нумерацию на УГО (рисунок 2.1) и в матрице у-параметров.

2.2 Основные уравнения многополюсника в форме у-параметров

Обобщим математическую модель четырехполюсника для случая большего числа полюсов на основе работы [18].

Рассмотрим линейный неавтономный многополюсник, находящийся под гармоническим внешним воздействием. Пусть напряжения всех выводов многополюсника относительно базисного задаются с помощью независимых источников напряжения (рис.2.9, а).

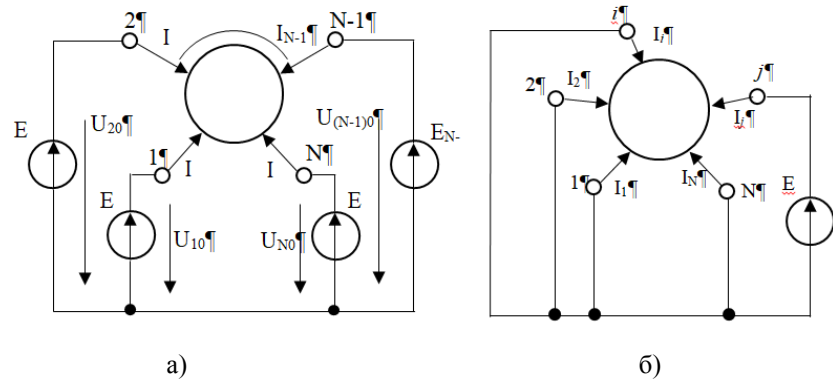


Рисунок 2.9. Линейные неавтономные многополюсники

а) задание напряжений на всех выводах многополюсника б) режим, когда все источники напряжения, кроме E, выключены

В соответствии с принципом наложения, ток каждого вывода равен сумме частичных токов, вызванных действием каждого из независимых источников напряжения в отдельности:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_1^{(1)} + I_1^{(2)} + \dots + I_1^{(N)} = Y_{11} E_1 + Y_{12} E_2 + \dots + Y_{1N} E_N; \\
 I_2 &= I_2^{(1)} + I_2^{(2)} + \dots + I_2^{(N)} = Y_{21} E_1 + Y_{22} E_2 + \dots + Y_{2N} E_N; \\
 &\dots \dots \dots \\
 I_N &= I_N^{(1)} + I_N^{(2)} + \dots + I_N^{(N)} = Y_{N1} E_1 + Y_{N2} E_2 + \dots + Y_{NN} E_N;
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

, где $I_i^{(j)}$ – частичный ток i -го вывода, вызванный действием источника E_j в режиме, когда все остальные независимые источники напряжения выключены (закорочены).

Коэффициенты уравнений (2.3) – первичные параметры многополюсника – имеют физический смысл входных и передаточных проводимостей, определенных в режиме короткого замыкания, Y-параметры многополюсника.

Из (2.3) следует, что:

$$Y_{ij} = I_j^{(i)} / E_j \tag{2.4}$$

В формуле (2.4) записана комплексная входная проводимость многополюсника со стороны зажима j (комплексная входная проводимость между полюсом j и соединенными вместе всеми остальными полюсами), измеренная в режиме, когда все источники напряжения, кроме E_j , выключены (рис. 2.9б).

Аналогично, получаем:

$$Y_{ij} = I_i^{(j)} / E_j \quad (2.5)$$

Имеет физический смысл передаточной проводимости от полюса j к полюсу i , определенный в режиме, когда все источники напряжения, кроме E_j , выключены (рис. 2.9б).

Заменяя в уравнениях (2.3) ЭДС источников соответствующими напряжениями и используя матричную форму записи, получаем:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \\ \dots \\ U_{N0} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Уравнения (2.6) являются основными уравнениями многополюсника в форме Y . Квадратная матрица (2.7) является неопределенной матрицей проводимости или неопределенной матрицей y -параметров многополюсника.

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3 Метод многополюсных подсхем

Для дальнейших вычислений воспользуемся методом многополюсных подсхем. Метод основан на разделении сложной схемы (или системы уравнений) на простые подсхемы (подсистемы) с учетом связей между ними.

Для использования данного метода необходимо разбить всю схему соединений на подсхемы. Так как в нашей структуре участвуют два четырехполюсника, то очевидно, что оба четырехполюсника будут отдельными подсхемами. Далее необходимо пронумеровать узлы связей между подсхемами. Нумерация узлов двух С-Р-НС ЭРП представлена на рисунке 2.10.

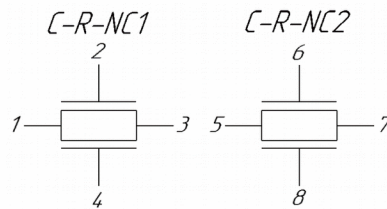


Рисунок. 2.10. Нумерация узлов двух C-R-NC ЭРП при составление глобальной матрицы

В соответствии с нумерацией узлов составляется глобальная матрица u -параметров. Глобальная матрица u -параметров – это матрица проводимостей, которая объединяет все параметры подсхем для анализа всей структуры в целом.

Принцип заполнения глобальной Y -матрицы описан в [19] и может быть представлен в виде следующего алгоритма:

- 1) Для двух C-R-NC ЭРП, на которые условно разбита вся схема, вычисляем

матрицы проводимости $Y^i = \begin{bmatrix} y_{jk}^i \end{bmatrix}$, $j = \overline{1, N}$, $k = \overline{j, N}$; где N – порядок матрицы проводимости одного C-R-NC ЭРП.

- 2) Для всех элементов каждой матрицы Y^i вычисляем строку и столбец глобальной матрицы, в соответствии с номером узла (рисунок 2.4) и номерами локальных узлов j и k (рисунок 2.1), то есть $r = U(i, j)$ и $c = U(i, k)$, где U – матрица с номерами узлов.

- 3) Заполняем глобальную матрицу проводимости, присваивая элементы матриц Y^i C-R-NC ЭРП соответствующим п.2 узлам: $Y_{global}[r, c] = Y_{global}[r, c] + Y_i[j, k]$.

Результат составления глобальной матрицы проводимостей для двух C-R-NC ЭРП (рисунок 2.10), представлен ниже:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

После составления глобальной матрицы проводимостей, необходимо учесть связи между узлами подсхем, которые соответствуют различным схемам включения

четыреполюсников, для этого последовательно преобразуем глобальную матрицу (2.7), используя следующие правила [18]:

1. Если контакт с номером N соединен с землей (общий или базисный узел), тогда напряжение на данном выводе равно нулю и, следовательно, данный узел необходимо исключить из системы уравнений, для этого строки и столбцы с порядковым номером N вычеркиваются с матрицы Y -параметров;

2. Если два каких-либо вывода многополюсника, например с номерами k и N , объединяются в один полюс, которому присваивается номер k , то ток, протекающий по полученному соединению, равен сумме токов k -го и N -го выводов. При этом в основной системе уравнений многополюсника уравнения для токов k -го и N -го выводов заменяются одним уравнением. Следовательно, при объединении k -го и N -го полюсов в один k -й полюс k -я и N -я строки и столбцы матрицы Y -параметров суммируются и становятся k -ой строкой и столбцом;

3. Если какой-либо вывод многополюсника, например N -й, не используется при его соединении с остальной частью цепи, т.е. является внутренним узлом многополюсника, то необходимо вычеркнуть N -ую строку и столбец, и заменить остальные элементы матрицы Y -параметров на новые, определяемые с помощью соотношения:

$$Y_{ij} = Y_{ij} - Y_{iN} \cdot Y_{Nj} / Y_{NN} \quad (2.8)$$

Рассмотрим пример преобразования глобальной Y -матрицы для конкретной схемы включения двух С-Р-НС ЭРП, изображенной на рис. 2.11.

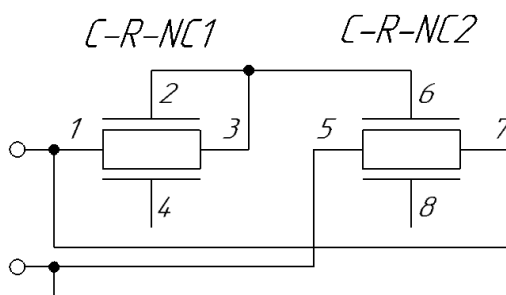


Рисунок 2.11. Вариант схемы включения

Анализируя рисунок 2.11, последовательно преобразуем исходную матрицу (2.7), используя правила, изложенные выше.

Шаг 1:

Для вывода 5, соединенный с общим узлом, согласно п.1 правил преобразования матрицы проводимостей, необходимо зачеркнуть пятую строку Y_{5j} и столбец Y_{i5} в глобальной матрице проводимости. Получаем матрицу $Y2$ с размерностью 7×7 :

$$Y_2 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} \end{bmatrix}$$

Шаг 2:

Выводы 2,3 и 6 объединены в один полюс, тогда, согласно п.2 правил преобразования матрицы проводимости, необходимо сложить строки Y_{2j} , Y_{3j} и Y_{6j} в строке Y_{2j} , а затем столбцы Y_{i2} , Y_{i3} и Y_{i6} в столбце Y_{i2} . Далее строки Y_{3j} и Y_{6j} и столбцы Y_{i3} и Y_{i6} вычеркиваются из матрицы у-параметров. Получаем матрицу Y_3 с размерностью 5x5:

$$Y_3 = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12}+Y_{13} & Y_{14} & 0 & 0 \\ Y_{21}+Y_{31} & Y_{22}+Y_{23}+Y_{32}+Y_{33} & Y_{24}+Y_{34} & Y_{67} & Y_{68} \\ Y_{41} & Y_{42}+Y_{43} & Y_{44} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{76} & 0 & Y_{77} & Y_{78} \\ 0 & Y_{86} & 0 & Y_{87} & Y_{88} \end{bmatrix}$$

Шаг 3:

Контакты 1 и 7 объединены, следовательно, по такому же принципу, что и в предыдущем шаге необходимо сложить строки Y_{1j} и Y_{7j} в строке Y_{1j} , а затем столбцы Y_{i1} и Y_{i7} в столбце Y_{i7} . Далее удалить строку Y_{7j} и столбец Y_{i7} в матрице проводимости. Получаем матрицу Y_4 с размерностью 4x4:

$$Y_4 = \begin{bmatrix} Y_{11}+Y_{77} & Y_{12}+Y_{13}+Y_{76} & Y_{14} & Y_{78} \\ Y_{21}+Y_{31}+Y_{67} & Y_{22}+Y_{23}+Y_{32}+Y_{33} & Y_{24}+Y_{34} & Y_{68} \\ Y_{41} & Y_{42}+Y_{43} & Y_{44} & 0 \\ Y_{87} & Y_{86} & 0 & Y_{88} \end{bmatrix}$$

Шаг 4:

Согласно п.3, правил преобразования матрицы проводимости, если какой-либо вывод многополюсника, например N -й, не используется, т.е. является внутренним узлом многополюсника, то элементы матрицы проводимостей пересчитываются по формуле (2.8), а строка Y_{Nj} и столбец Y_{iN} вычеркиваются из матрицы у-параметров. В нашем случае таким внутренним полюсом является вывод 8. Получаем матрицу Y_5 с размерностью (3x3).

$$Y_5 = \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_{77} - \frac{Y_{78} Y_{87}}{Y_{88}} & Y_{12} + Y_{13} + Y_{76} - \frac{Y_{78} Y_{87}}{Y_{88}} & Y_{14} \\ Y_{21} + Y_{31} + Y_{67} - \frac{Y_{68} Y_{87}}{Y_{88}} & Y_{22} + Y_{23} + Y_{32} + Y_{33} - \frac{Y_{68} Y_{86}}{Y_{88}} & Y_{24} + Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} + Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

Шаг 5:

Так как контакт 4, так же как и контакт 8, является внутренним узлом многополюсника, то выполним те же операции что и в предыдущем шаге. В результате получим матрицу Y_6 с размерностью 2×2 .

$$Y_6 = \begin{bmatrix} Y_{11}^i & Y_{12}^i \\ Y_{21}^i & Y_{22}^i \end{bmatrix}$$

$$Y_{11}^i = Y_{11} + Y_{77} - \frac{Y_{78} Y_{87}}{Y_{88}} - \frac{Y_{14} Y_{41}}{Y_{44}}$$

$$Y_{12}^i = Y_{12} + Y_{13} + Y_{76} - \frac{Y_{78} Y_{87}}{Y_{88}} - \frac{Y_{14} (Y_{42} + Y_{43})}{Y_{44}}$$

$$Y_{21}^i = Y_{21} + Y_{31} + Y_{67} - \frac{Y_{68} Y_{87}}{Y_{88}} - \frac{(Y_{24} + Y_{34}) Y_{41}}{Y_{44}}$$

$$Y_{22}^i = Y_{22} + Y_{23} + Y_{32} + Y_{33} - \frac{Y_{68} Y_{86}}{Y_{88}} - \frac{(Y_{24} + Y_{34}) (Y_{42} + Y_{43})}{Y_{44}}$$

2.4 Преобразование матрицы u -параметров в матрицу z -параметров

В нашей работе необходимо получить не проводимость, а импеданс ЭФИ, т.е. матрицу z -параметров. Для этого, после пересчета матрицы u -параметров, в зависимости от схемы включения, можно получить, из соотношения между неопределенными матрицами проводимостей и сопротивлений многополюсника, матрицу z -параметров по следующим правилам [20]:

1. Если матрица u -параметров получилась размерностью 1×1 , то z -параметр вычисляется по формуле:

$$Z_{11} = \frac{1}{Y_{11}} \quad (2.9)$$

2. Если матрица u -параметров получилась размерностью 2×2 , то z -параметр вычисляется по следующему соотношению:

$$Z_{11} = \frac{Y_{22}}{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}} \quad (2.10)$$

3. Если матрица y -параметров получилась размерностью больше, чем 2×2 , то необходимо уменьшить матрицу до размерности 2×2 путем вычеркивания последнего столбца и строки, например под номером N , и заменить остальные элементы матрицы y -параметров на новые, определяемые с помощью соотношения (2.8). После того как матрица y -параметров станет размерностью 2×2 необходимо воспользоваться вторым правилом для получения матрицы z -параметров.

Из приведенных правил видно, что в итоге у нас должно получиться одно значение z -параметра, которое зависит от частоты. Далее, меняя частоту можно получить массив значений Z_{11} и построить график ФЧХ.

2.5 Разработка алгоритма и программы анализа ЭФИ на основе y -параметров

2.5.1 Генерирование вариантов схем включения четырехполюсников

Чтобы задать схему включения воспользуемся матрицами инцидентности, такими матрицами в нашей программе будут: матрица узлов, соединенных с землей (GND) размерностью 1×8 , матрица неиспользуемых контактов (FLOAT) размерностью 1×8 и матрица соединений (CON) размерностью 8×8 .

Матрицу соединений будем изначально задавать такой что бы удобнее было ее обрабатывать. Алгоритм задания матрицы соединений следующий: 1) создать нулевую матрицу размерностью 8×8 ; 2) установить единицы только в тех ячейках, где имеется связь между контактами (главная диагональ остается со значениями ноль), при этом, не должно быть дублирования одного и то же соединения в двух разных ячейках; 3) при установке единицы в ячейку следует учесть, что строка должна иметь меньший порядковый номер, чем столбец. Пример матриц инцидентности, для схемы включения представленного на *рисунке 2.11*, приведено ниже:

$$GND = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (2.11)$$

$$FLOAT = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (2.12)$$

$$CON = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ради упрощения анализа условимся в том, что входной контакт всегда будет под номером 1, следовательно, из основных свойств неопределенных матриц проводимостей и

сопротивлений линейных неавтономных многополюсников [18] видно, что нам не придется перемещать столбцы и строки матрицы u -параметров.

При формировании вариантов схем включения необходимо учесть следующие ограничения: контакты 2, 4 и 6, 8 одного С-R-NC ЭРП не должны быть замкнуты между собой; контакт 1 в базе схем включения должен оставаться неиспользуемым, для дальнейшего поиска схем включений.

Несмотря на указанные ограничения, оказалось, что можно сгенерировать 140 различных вариантов схем соединений двух С-R-NC ЭРП.

Примеры некоторых вариантов схем включения приведены на *рис. 2.12*.

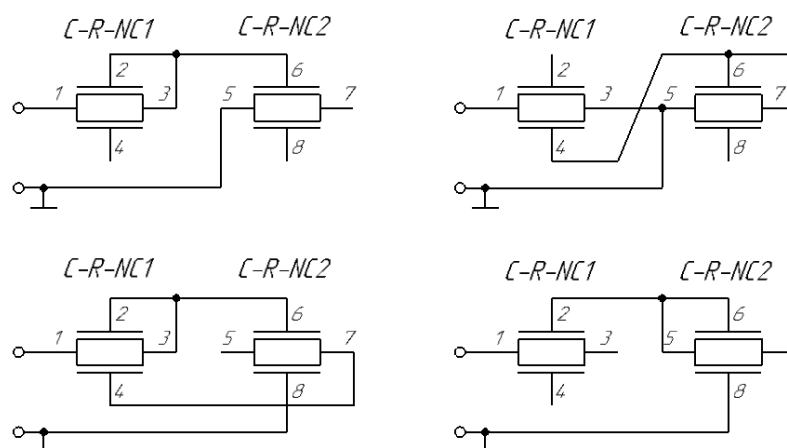


Рисунок 2.12. Варианты схем включения двух С-R-NC структур

2.5.2 Блок-схема программы анализа

Исходя из рассмотренных математических моделей и алгоритмов и методики, создадим программу анализа в среде MATLAB. Данная программа должна преобразовывать глобальную матрицу u -параметров, в зависимости от матриц инцидентности, на диапазоне частот, который задает пользователь. Результатом работы программы служит массив значений ФЧХ импедансов всех вариантов схем соединений двух С-R-NC ЭРП четырехполюсника. Блок-схема работы программы приведена на *рисунке 2.13*.

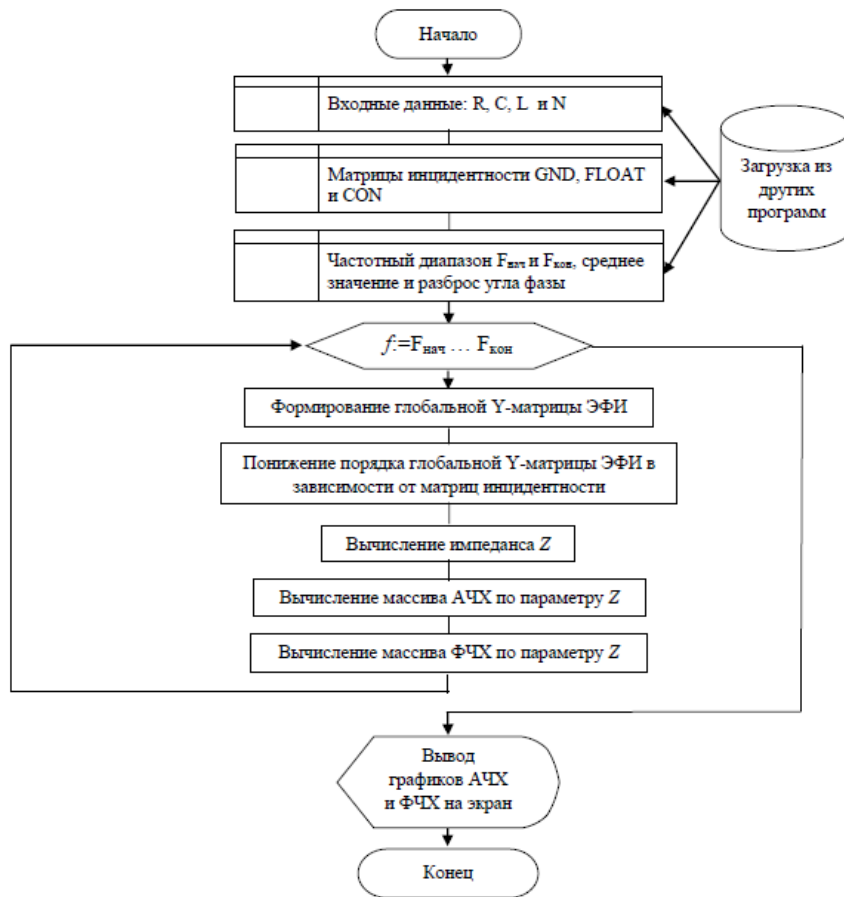


Рисунок 2.13. Блок-схема программы анализа

ГЛАВА 3 Разработка программы синтеза ЭФИ в среде MATLAB

3.1 Разработка программы отбора вариантов схем включения С-R-NC ЭРП, удовлетворяющих заданным требованиям

В главе 2 мы рассмотрели программу анализа и оценили базу схем соединений двух С-R-NC элементов. Можно заметить, что в нашем случае, для поиска нужной схемы коммутации, нет необходимости в построении сложных алгоритмов синтеза, достаточно будет обойтись методом перебора.

Для увеличения количества схем коммутаций будем дополнительно соединять входной контакт с неподключенными внутренними контактами (FLOAT). Подобное действие также улучшит взаимосвязь двух С-R-NC структур, добавляя еще одну степень свободы, что позволит получить более качественное ЭФИ.

Так как наша работа направлена на то, чтобы найти такие схемы включения двух С-R-NC ЭРП, которые обеспечивают заданные параметры ЭФИ, то необходимо определить сам факт того, что фаза импеданса двухполюсника (φ_z) на основе текущей схемы коммутации на определенном участке частот отвечает заданным требованиям. Данную проверку можно осуществить простым способом, для этого необходимо вычислить количество точек в заданном диапазоне частот, в которых φ_z из массива z -параметра попадают в интервал фаз, заданный в начальных условиях пользователем (рисунок 3.1). Здесь φ_c – значение заданного уровня постоянства фазы, φ_i – отклонение значения фазы входного импеданса оцениваемого варианта С-R-NC ЭРП, ε – допустимая неравномерность ФЧХ входного импеданса, F_{\min} и F_{\max} – максимальная и минимальная частоты диапазона, в котором производится поиск ЭФИ. Обозначим это количество точек переменной β .

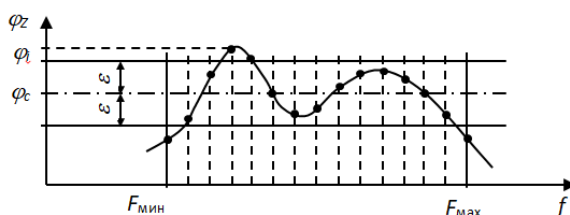


Рисунок 3.1. Пример вычисления количества точек попадания в окно

Результатом работы данной программы будет схема коммутации, в которой β количество точек z -параметра, на определенном участке частот и фаз больше, чем при других схемах коммутаций. Блок схема программы представлена на рисунке 3.2.

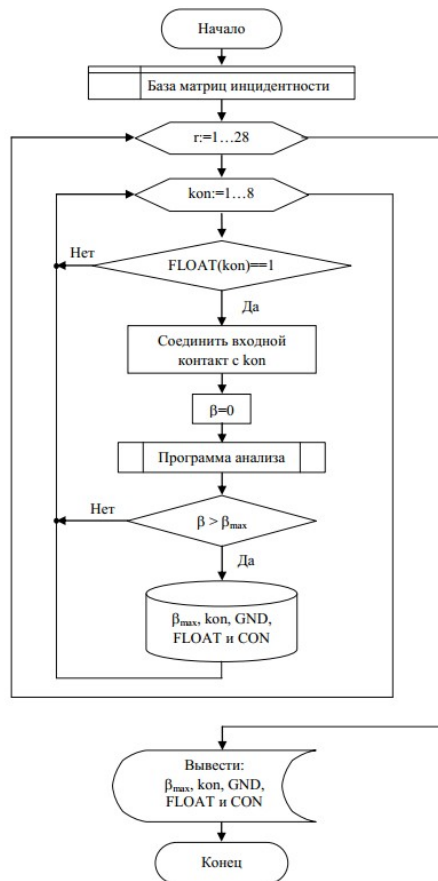


Рисунок 3.2. Блок-схема программы синтеза

3.2 Разработка программы оптимизации параметров С-R-NC ЭРП N и L

Из предыдущего параграфа видно, что результатом работы программы синтеза является найденная схема включения двух С-R-NC ЭРП. Далее необходимо оптимизировать параметры элементов, для того чтобы увеличить количество точек β , которые попадают в искомое окно. В качестве оптимизируемых параметров будем использовать N (отношение емкостей С-R-NC ЭРП) и L (условная длина одной секции).

Значения параметров N для всех секции выбираются одинаковыми (так как все слои секций выполняются в одном технологическом цикле). Диапазон возможных вариаций параметра N ограничим от 1 до 10. Для параметра L также существуют ограничения, а именно, сумма длин секций двух С-R-NC ЭРП должна равняться двум. Из этого следует, что программа должна выбрать такую комбинацию параметров N и L , при которой будет достигнут максимум $\beta = f(N, L)$.

Блок-схема программы оптимизации приведена на *рисунке 3.3*.

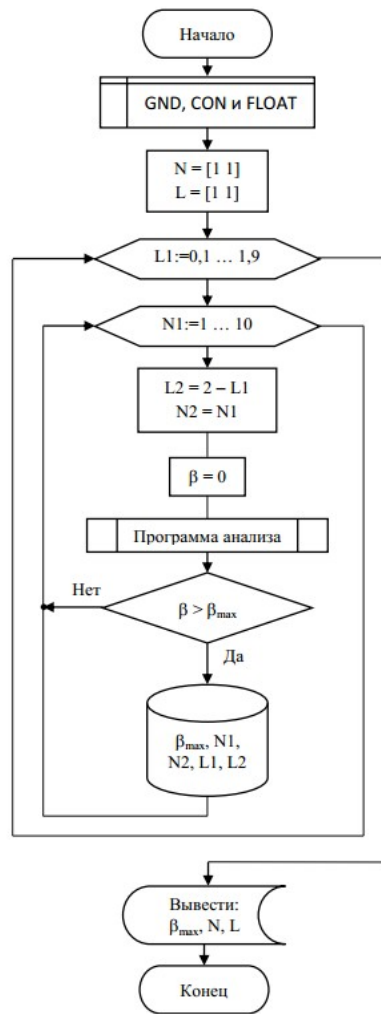


Рисунок 3.3. Блок-схема программы оптимизации

После того, как найдена схема коммутации и оптимизированы параметры N и L выводится график ФЧХ импеданса найденной схемы замещения ЭФИ. График ФЧХ строится в логарифмическом масштабе по оси частот. Количество точек для построения графика рано 1001. Пример полученного графика представлен на *рисунке 3.4*.

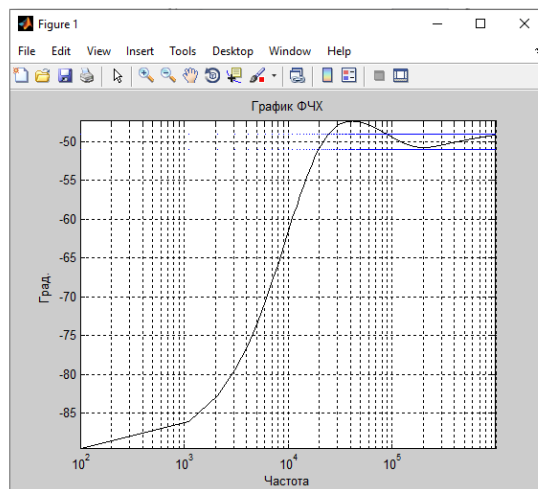


Рисунок 3.4. Окно графика ФЧХ

3.3 Проверка адекватности результатов программы синтеза на основе C-R-NC ЭРП

Для физической реализации ЭФИ необходимо учесть следующие технические требования:

1. Выбрать несколько значений уровня постоянства ФЧХ импеданса ЭФИ от -45° до -90° , остановимся на следующих уровнях постоянства ФЧХ: -50° , -60° , -70° .

2. Минимальная ширина диапазона частот постоянства ФЧХ входного импеданса 1 декада. Диапазон интересующих частот должен лежать в пределах от 1кГц до 10МГц: более низкие частоты редко встречаются в задачах обработки сигналов, а на более высоких частотах можно столкнуться с проблемой адекватных измерений ФЧХ входного импеданса.

3. Интегрировать все разработанные ЭФИ на одно конструктивное основание с целью возможности их групповой подстройки или сложной коммутации нескольких ЭФИ в виде единого интегрального модуля.

Так как диапазон рабочих частот ЭФИ лежит в области низких (средних) частот, размеры частей конструкций толстопленочных ЭФИ будут занимать большую площадь и все синтезированные ЭФИ должны быть изготовлены в одном технологическом цикле, рационально использовать в качестве основания – полированную подложку со стандартными габаритными размерами $48 \times 60 \times 1$ (Б47.374.000-07, Б40.737.000ТУ-84) из алюмооксидной керамики ВК-94-1 Al_2O_3 94,4% (аЯ0.027.002ТУ).

Чтобы выполнить все требования и найти оптимальные конструкции для изготовления ЭФИ, мы вели поиск с разными погонными параметрами на каждом уровне постоянства фаз, используя программный модуль синтеза. Затем, «вручную» проанализировав полученные варианты, выбрали 3 самых оптимальных ЭФИ (*рисунки 3.5, 3.7 и 3.9*).

Для проверки корректности работы программы синтеза все положительные результаты синтеза были проверены в программе схемотехнического моделирования OrCAD (модель описана в *параграфе 2.1*). Результаты моделирования представлены на *рисунках 3.6, 3.8 и 3.10*.

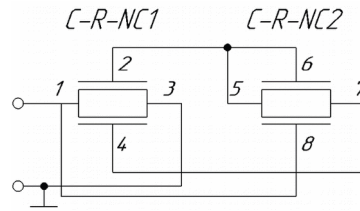


Рисунок 3.5. Полученная схема в программе синтеза C-R-NC ЭРП по уровню постоянства импеданса фазы $-50^\circ \pm 2^\circ$ (параметры схемы: $R_{nz.1} = R_{nz.2} = 100 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 1 \text{ нФ}$; $L_1 = 0,6$; $L_2 = 1,4$; $N = 8$)

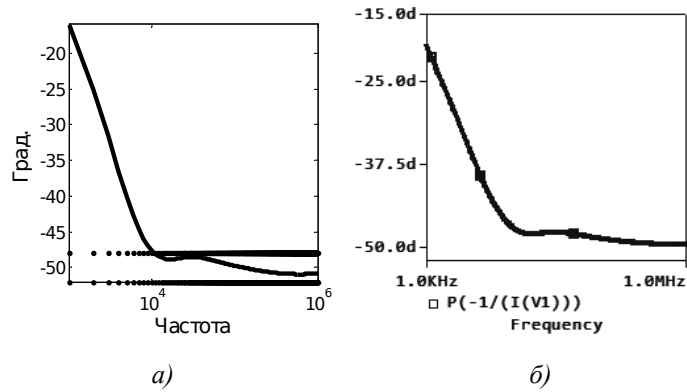


Рисунок 3.6. ФЧХ импеданса синтезированной схемы по уровню постоянства фазы $-50^\circ \pm 2^\circ$ а) в программе синтеза C-R-NC ЭРП; б) в программе OrCAD на основе 512-звенной SPice-модели

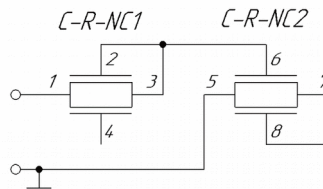


Рисунок 3.7. Полученная схема в программе синтеза C-R-NC ЭРП по уровню постоянства импеданса фазы $-60^\circ \pm 2^\circ$ (параметры схемы: $R_{nz.1} = R_{nz.2} = 100 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 1 \text{ нФ}$; $L_1 = 0,95$; $L_2 = 1,05$; $N = 5$)

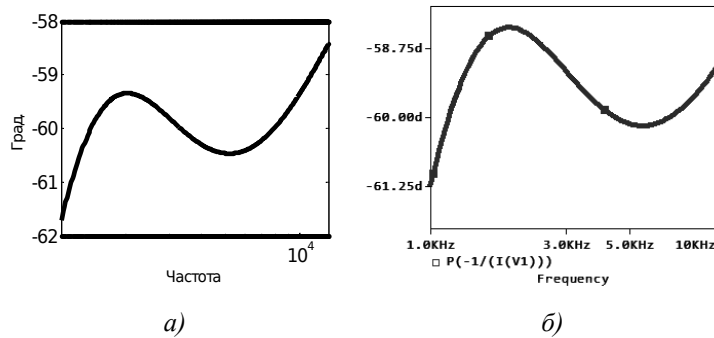


Рисунок 3.8. ФЧХ импеданса синтезированной схемы по уровню постоянства фазы $-60^\circ \pm 2^\circ$: а) в программе синтеза C-R-NC ЭРП; б) в программе OrCAD на основе 512-звенной SPice-модели

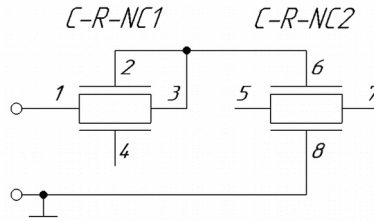


Рисунок 3.9. Полученная схема в программе синтеза C-R-NC ЭРП по уровню постоянства импеданса фазы $-70^\circ \pm 2^\circ$ (параметры схемы: $R_{nz.1} = R_{nz.2} = 100 \text{ кОм}$; $C_1 = C_2 = 1 \text{ нФ}$; $L_1 = 1,2$; $L_2 = 0,8$; $N = 5$)

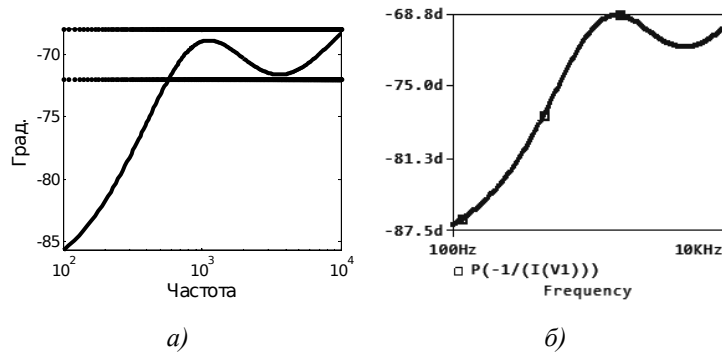


Рисунок 3.10. ФЧХ импеданса синтезированной схемы по уровню постоянства фазы $-70^\circ \pm 2^\circ$: а) в программе синтеза C-R-NC ЭРП; б) в программе OrCAD на основе 512-звенной SPice-модели

Как видно из рисунков ФЧХ синтезированных ЭФИ (рисунки 3.6, а), 3.8, а) и 3.10, а) совпадают с ФЧХ многозвенных моделей (рисунки 3.6, б), 3.8, б) и 3.10, б), что дает основание считать результаты синтеза адекватными и достаточными для дальнейшего их использования в полученных конструкциях.

3.4 Разработка интерфейса программы

Конечным результатом разработки программного продукта, является программа с графическим интерфейсом пользователя (ГПИ). В нашем случае нам необходимо создать два окна: окно задания требуемых параметров ЭФИ и окно визуализации результатов синтеза в конце работы программы.

Программа MATLAB имеет в своем составе готовую среду разработки элементов интерфейса GUIDE. Для создания окна в начале работы программы воспользуемся данной средой. Подробный процесс и описание конструктива среды GUIDE имеется в [21]. Результат разработки интерфейса установки начальных параметров поиска, представлен на рисунке 3.11.

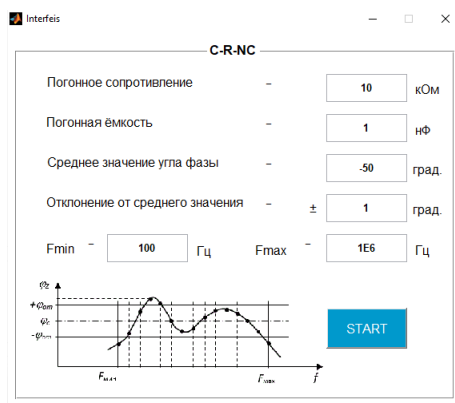


Рисунок 3.11. Начальное окно задания параметров поиска

На первоначальном этапе необходимо ввести информацию, однозначно характеризующую объект и условия синтеза, а именно, погонные параметры емкость (C) и сопротивление (R) и параметры окна ЧХ, определяющие частотный диапазон, в котором будет производиться поиск ЭФИ, и допустимая неравномерность ФЧХ импеданса (диапазон угла фазы и диапазон частот).

После нажатия на кнопку **START**, последовательно запускаются подпрограммы синтеза и оптимизации. Результаты синтез отображаются в виде окна графика ФЧХ импеданса (рисунок 3.4) и окна второго ГПИ со схмотехнической моделью ЭФИ (рисунок 3.12).

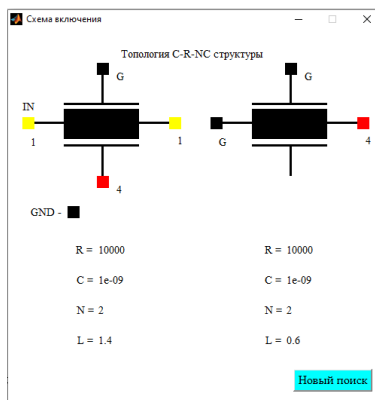


Рисунок 3.12. Окно результатов работы программы

Интерфейс, представленный на *рисунке 3.12*, был реализован вручную, с помощью функций дескрипторной графики [21], это связано с тем, что в среде GUIDE отсутствует возможность рисования геометрических фигур.

ГЛАВА 4 Разработка конструкции ЭФИ на основе RC-ЭРП со структурой слоев вида C-R-NC

Обобщая результаты, полученные в предыдущих главах, можно сказать, что результатом работы программы синтеза ЭФИ со структурой слоев вида C-R-NC является схема внутренней коммутации, длины L_i , погонные параметры слоев (R и C) и коэффициент $N=C_2/C_1$. Все эти параметры обеспечивают выполнение заданной формы ФЧХ импеданса ЭФИ в заданном диапазоне частот.

Следующая задача проектирования состоит в том, чтобы от модели перейти к конструкции (топологии) ЭФИ. Для этого необходимо перейти от безразмерных длин секций C-R-NC ЭРП в модели L_{0i} при их условной ширине $W_0 = 1$, к реальным размерам ЭФИ: L_i и W . Не трудно показать, что при известных погонных параметрах модели $R_{пр}$ и $C_{пр}$ и удельных параметрах резистивного и диэлектрического слоев $R_{y\delta}$ и $C_{y\delta}$, соответственно, выбранных для изготовления ЭФИ, реальные размеры элемента можно найти из соотношений:

$$\begin{cases} \frac{L_i}{W} R_{y\delta} = L_{0i} \cdot R_{nz} \\ W \cdot L_i \cdot C_{y\delta} = L_{0i} \cdot C_{nz} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L_i = \sqrt{\frac{R_{nz} \cdot C_{nz}}{R_{y\delta} \cdot C_{y\delta}}} \cdot L_{0i} \\ W = \sqrt{\frac{R_{y\delta} \cdot C_{nz}}{R_{nz} \cdot C_{y\delta}}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Из уравнений (4.1) можно выразить $R_{y\delta}$ и подставить его первую формулу, в результате чего, длина будет определяться по формуле:

$$L_i = \frac{C_{nz} \cdot L_{0i}}{C_{y\delta} \cdot W} \quad (4.2)$$

Так как в нашем случае уже задано значение коэффициента формы $K_\phi = L_i/W = L_{0i}$, то не трудно вычислить ширину ЭРП подставив выражение (4.2) в формулу коэффициента формы:

$$W = \sqrt{\frac{C_{nz}}{C_{y\delta}}} \quad (4.3)$$

Следовательно, перед расчетом топологии ЭРП необходимо определиться с удельными параметрами емкости.

Синтезированные конструкции ЭФИ состоят из 5 слоев толстых пленок. В местах установки контактных площадок количество слоев увеличивается до 6. При формировании каждого слоя (резистивного, проводящего и диэлектрического) используют соответствующие пасты, которые через сетчатый трафарет наносят на подложку, подвергают сушке и вжиганию.

В качестве диэлектрического слоя выберем пасту серии 6000 ТУ-006-00387275-2012 с удельной ёмкостью $C_{уд} = 52$ пФ/мм².

Используя значение $C_{уд}$ и формулы (4.2) и (4.3) легко вычислить параметры синтезированного ЭРП. Вычисленные геометрические размеры спроектированных ЭФИ представим в виде *таблицы 4.1*.

Таблица 4.1 – Значение топологических размеров ЭФИ

ЭФИ	$L_1, мм$	$L_2, мм$	$W, мм$	$S, мм^2$
-50°	2,6	6,1	4,4	38,3
-60°	4,2	4,6	4,4	38,72
-70°	5,2	3,5	4,4	38,28

Примечание: все расчеты проведены с округлением до десятых значений.

Спроектируем конструкцию ЭФИ пользуясь *таблицей 4.1*. Результаты представлены на *рисунках 4.1, 4.2 и 4.3*.

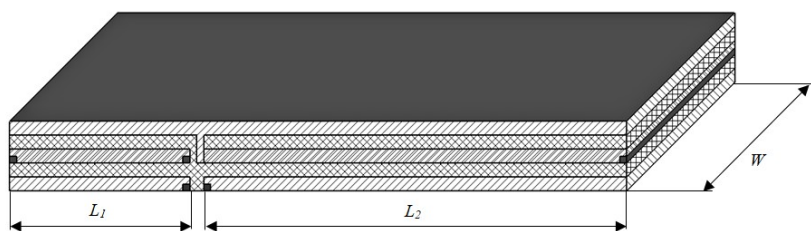


Рисунок 4.1. Эскизное изображение поперечного сечения с обозначением секций проектируемого ЭФИ с уровнем постоянства ФЧХ импеданса $-50^\circ \pm 2^\circ$

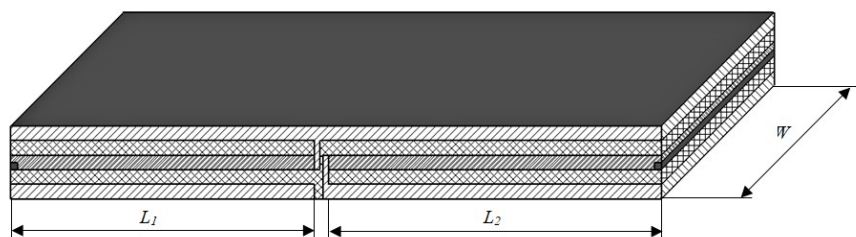


Рисунок 4.2. Эскизное изображение поперечного сечения с обозначением секций проектируемого ЭФИ с уровнем постоянства ФЧХ импеданса $-60^\circ \pm 2^\circ$

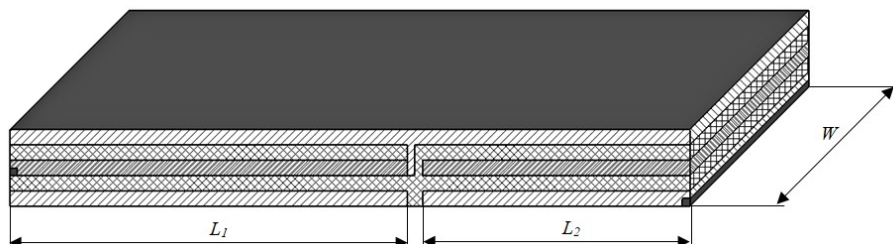


Рисунок 4.3. Эскизное изображение поперечного сечения с обозначением секций проектируемого ЭФИ с уровнем постоянства ФЧХ импеданса $-70^\circ \pm 2^\circ$

Для того чтобы адекватно оценить параметры изготовленных ЭФИ, а также точно измерить параметры отдельных слоев в процессе изготовления, необходимо предусмотреть контрольные элементы. Как правило, размеры, геометрия и расположение контрольных элементов выбирается максимально близкое к аналогичным параметрам изготавливаемых ЭФИ.

В качестве контрольных элементов выберем следующие:

1. Контрольные конденсаторы. Изготовим их как классический конденсатор – обкладки сформируем из проводящей пасты. Диэлектрические слои пасты выберем в соответствии с нижним и верхним диэлектрическими слоями. Форму выберем аналогичную форме проектируемых ЭФИ. Размеры в *таблице 4.2*.

2. Контрольный резистор. Сформируем его из резистивной пасты применяемого в проекте на свободном месте подложки. Размеры в *таблице 4.2*.

3. Контрольный С-R-NC ЭРП. Сформируем однородный С-R-NC ЭРП с электрическими контактами по торцам резистивного слоя и на проводящих верхних и нижних слоях. Размеры в *таблице 4.2*.

Таблица 4.2 – Значения топологических размеров контрольных элементов на керамической подложке

Наименование	Длина, мм	Ширина, мм	S, мм ²
Контрольный конденсатор	4,2	4,4	18,48
Контрольный резистор	4,2	4,4	18,48
Контрольный С-R-NC ЭРП	4,4	4,4	19,36

Примечание: все расчеты проведены с округлением до десятых долей.

Зная размеры конструкций ЭФИ и контрольных элементов, можно спроектировать компоновку их относительно друг друга на керамической подложке, принимая во внимание следующие ограничения:

1. Минимальное расстояние между печатными элементами – 0,4мм;
2. Минимальное расстояние от края подложки до печатных элементов конструкции – 2мм;
3. Наличие реперных знаков (не менее 3-х) на свободном месте в углах подложки для совмещения слоев во время изготовления;
4. Максимальное рассовмещение слоев $\pm 100\text{мкм}$;
5. Минимальная ширина проводника – 200мкм.

6. Минимальные размеры контактных площадок – 0,5мм×0,5мм

Послойную топологию всех структур спроектировали в САПР КОМПАС-3D для последующего изготовления сетчатых трафаретов. При компоновке все структуры помещались на половине подложки, поэтому решено было мультиплицировать полученный проект на вторую половину подложки.

Комплект конструкторской документации на послойную топологию приведен в *приложении Б*.

Исходя из требований КД *приложения Б* был осуществлен финальный подбор паст – *таблица 4.3*.

Таблица 4.3 – Наименования и характеристики толсто пленочных паст

№	Наименование слоя	Марка пасты	Удельное сопротивление (ρ , Ом/мм ²)	Площадь слоя, см ²	Метод нанесения
1	Проводники, контактные площадки	Паста 1130 ТУ 002-00387275-2012	0,035	3,9871	Трафаретная печать
2	Межслойная изоляция 1	Паста 6000 ТУ 006-00387275-2012	$R_{из} \geq 10^8$ Ом	4,7844	
3	Проводники, контактные площадки	Паста 1130 ТУ 002-00387275-2012	0,035	0,6623	
4	Резистивный слой	Паста 3145 ТУ 003-00387275-2012	$1 \cdot 10^5$	3,0624	
5	Межслойная изоляция 2	Паста 6000 ТУ 006-00387275-2012	$R_{из} \geq 10^8$ Ом	3,7897	
6	Проводники, контактные площадки	Паста 1130 ТУ 002-00387275-2012	0,035	3,6134	

Заключение

В ходе данной работы была разработана программа поиска схем коммутаций и оптимизации параметров N и L ЭФИ на основе двух С-R-NC ЭРП в среде MATLAB. Программа составлена на основе математической модели u -параметров элементов со структурой слоев вида С-R-NC.

В программе были синтезированы схемы коммутации двух С-R-NC ЭРП на нескольких значениях уровня постоянства ФЧХ импеданса ЭФИ -50° , -60° и -70° .

Следует отметить, что синтез ЭФИ на основе двух С-R-NC ЭРП не позволяет получить постоянство фазы ФЧХ импеданса в широком диапазоне частот. Увеличение диапазона частот постоянства фазы импеданса ЭФИ можно ожидать при увеличении числа С-R-NC ЭРП, образующих ЭФИ, как это сделано в [22] при синтезе ЭФИ на основе R-C-NR ЭРП.

Все положительные результаты работы программы были проверены в программе схемотехнического моделирования OrCAD на основе PSpice модели 512-звенных лестничных цепей, содержащих R- и С- элементы с сосредоточенными параметрами.

После синтезирования и проверки схем, был разработан конструктив элементов с последующим размещением их на керамической подложке, и разработкой послойной топологии всех структур в программе КОМПАС-3D для изготовления сетчатых трафаретов.

Таким образом, в работе с помощью разработанной программы синтеза показана возможность создания ЭФИ на основе С-R-NC ЭРП и впервые в мировой практике получены варианты схем замещения ЭФИ на этой основе.

Список использованных источников

1. Двухполюсные элементы с фрактальным импедансом и их применение в радиотехнике и связи / П. А. Ушаков, Г. Д. Бабошкин, С. В. Стойчев, В. Г. Гравшин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 75-105. DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-75-100
2. Mandelbrot B. (1987). The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Co.. New York. 1987
3. Oldham K.B., Spanier J. The Fractional Calculus. N.Y.: Acad. Press, 1974.
4. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университет книга, 2005.
5. Учайкин В.В. Метод дробных производных. Ульяновск: Артишок, 2008.
6. Podlubny I. Fractional Differential Equations. San Diego: Acad. Press, 1999.
7. Bard, L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods, Fundamentals and Applications", Wiley (2000). See Sect. 10.3.
8. Рашид Шакирович Нигматуллин и его научная школа // Фракталы и дробные операторы / Предисловие Ю.В. Гуляева, С.А. Никитова / Под ред. А.Х. Гильмутдинова. Казань: ФЭН, 2010. С. 9
9. Oustaloup, A. Systemes Asservis Lineaires d'Ordre Fractionnaire: Theorie et pratique' (Editions Masson, Paris, 1983)
10. Bohannan, G.W., Analog Realization of a Fractional Control Element - Revisited, Oct. 27, 2002.
11. Agambayev, A., Patole, S.P., Farhat, M., Elwakil, A., Bagci, H., Salama, K.N., Ferroelectric Fractional-Order Capacitors, Chem. Electro. Chem, vol. 4, 2807-2813, 2017.
12. Shahinpoor M., Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs). Smart Multi-Functional Materials and Artificial Muscles, vol. 2, P001-434, The Royal Society of Chemistry, Cambridge UK, 2016.
13. John, D.A., Banerjee, S., Bohannan, G.W., Biswas, K., Solid-state fractional capacitor using MWCNT-epoxy nanocomposite, Applied Physics Letters, vol. 110, paper ID 163504, 2017.
14. Haba T.C., Ablart G., Camps, T., Olivie F., Influence of electrical parameters on the input impedance of a fractal structure realised on silicon, Chaos, Solitons and Fractals, vol. 24, no. 2, pp. 479-490, 2005.

15. Гильмутдинов А.Х., Мокляков В.А. Ушаков П.А. Распределенные резистивно-емкостные элементы с фрактальной размерностью: конструкции, анализ, синтез и применение // Нелинейный мир, №10-11, 2007. – С. 633 – 638.

16. Гильмутдинов А.Х., Мокляков В.А., Ушаков П.А. Перспективы применения RC-элементов с распределенными параметрами для аналоговой обработки сигналов, идентификации и управления фрактальными объектами и процессами // Вестник КГТУ. 2007. № 3. С. 24 – 29.

17. Happ W.W., Castro P.S., Fuller W.D., Synthesis of solid state distributed parameter functions. – Sunnyvale, California 1962, pp. 262-278.

18. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1985 – С. 343 – 373.

19. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Сов. Радио, 1979 – С. 101-123

20. Пилипенко А.М. Основы теории четырехполюсников и электрических фильтров: учебное пособие / А.М. Пилипенко; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог; Издательство Южного федерального университета, 2019 – С. 11.

21. Ануфриев И.Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x– СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – С. 313 – 408.

22. Ушаков П.А. Разработка генетического алгоритма для синтеза конструкций фрактальных элементов на основе резистивно-емкостной среды со структурой слоев вида R-C-NR / П.А. Ушаков, К.О. Максимов // Вестник ИжГТУ, 2012, № 3 (55). С. 104 – 108.

23. Ушаков П.А. Разработка программы проектирования элементов с фрактальным импедансом на основе C-R-NC структур / П.А. Ушаков, И.В. Князев // сборник «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании». – Ижевск; Издательство ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2020.

СПРАВКА

Настоящую справку получил Князев Илья Васильевич для предоставления по месту требования в том, что его статья:

Разработка программы проектирования элементов с фрактальным импедансом на основе C-R-NC структур

была принята к публикации в сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании», которая состоялась 29.05. 2020 года.

Директор института
«Информатика и вычислительная техника»

И.О. Архипов

Ответственный редактор

К.Ю. Петухов

Ответственный секретарь

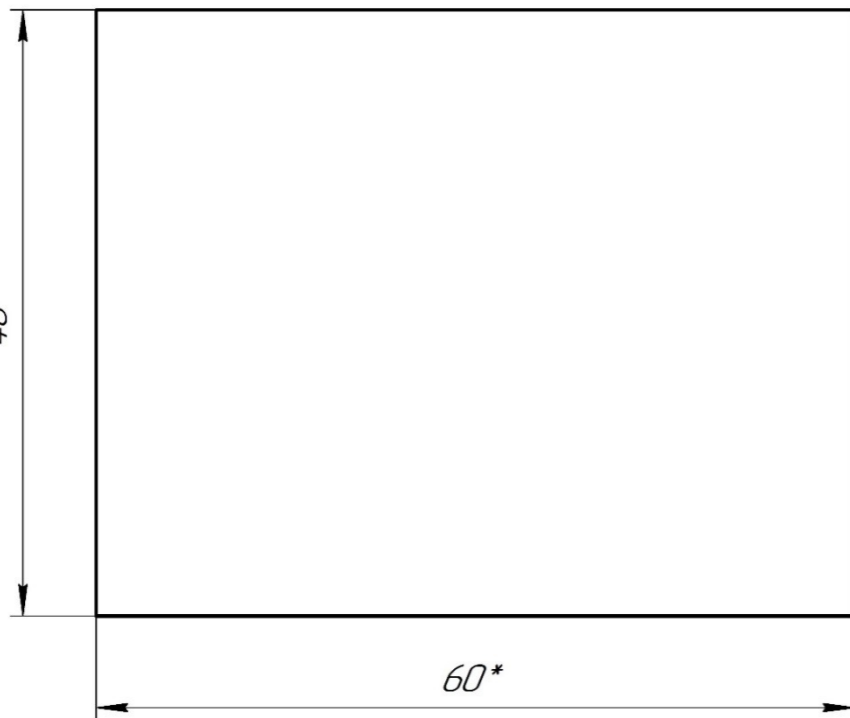
Т.Ю. Мерзлякова

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №

48*



1*

60*

1. *Размеры для справок.
2. Характеристики отдельных слоев и данные по их изготовлению приведены в таблице.
3. Конфигурация и размеры элементов обеспечиваются фотомасштабом. Предельное отклонение размеров $\pm 0,1$ мм.
4. Нумерация контактных площадок показана условно.
5. Допустимо наличие реперных знаков не указанных в чертеже платы.
6. Изготовление и контроль по ОСТ 107.750878.002.
7. Допускаются сколы по контуру кристалла не затрагивающие элементы топологии.
8. Допускаются следы щупов контактирующего приспособления на проводящем слое.

Таблица

Номер слоя	Наименование слоя	Материал слоя		Электрические характеристики	Площадь слоя, см ²	Метод нанесения	Номер листа черт.
		Марка	ТУ				
1	Проводники, контактные площадки	Паста 1130	ТУ-002-00387275-2012	$R_0=0,035 \text{ Ом/мм}^2$	3,9871	Трафаретная печать	2
2	Межслойная изоляция 1	Паста 6000	ТУ-002-00387275-2012	$R_{из} \geq 10^8 \text{ Ом}$	4,7844		3
3	Проводники, контактные площадки	Паста 1130	ТУ-002-00387275-2012	$R_0=0,035 \text{ Ом/мм}^2$	0,6623		4
4	Резистивный слой	Паста 3145	ТУ-002-00387275-2012	$R_0=10^5 \text{ Ом/мм}^2$	3,0624		5
5	Межслойная изоляция 2	Паста 6000	ТУ-002-00387275-2012	$R_{из} \geq 10^8 \text{ Ом}$	3,7897		6
6	Проводники, контактные площадки	Паста 1130	ТУ-002-00387275-2012	$R_0=0,035 \text{ Ом/мм}^2$	3,6134		7

Подп. и дата

Инд. № докл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.

				ИГТУ.454617.001			
Изм/Лист	№ док.м.	Подп.	Дата	<h1>Плата</h1>	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Князев						2:1
Пров.	Ушаков				Лист 1	Листов 7	
Т.контр.							
Н.контр.				Б4.7.374.000-07 БЧ0.737.000ТУ			
Утв.	Глушков						

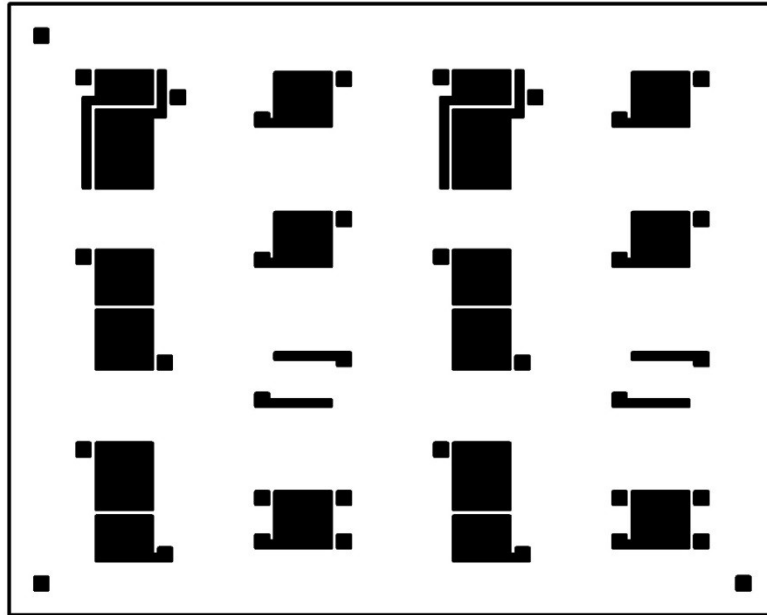
Копировал

Формат А3

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

ИГТУ.454617.001

Плата

ТУ-002-00387275-2012

Лист	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 2		Листов 7

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Князев		
Пров.		Ушаков		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.		Глушков		

Копирован

Формат А4

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №

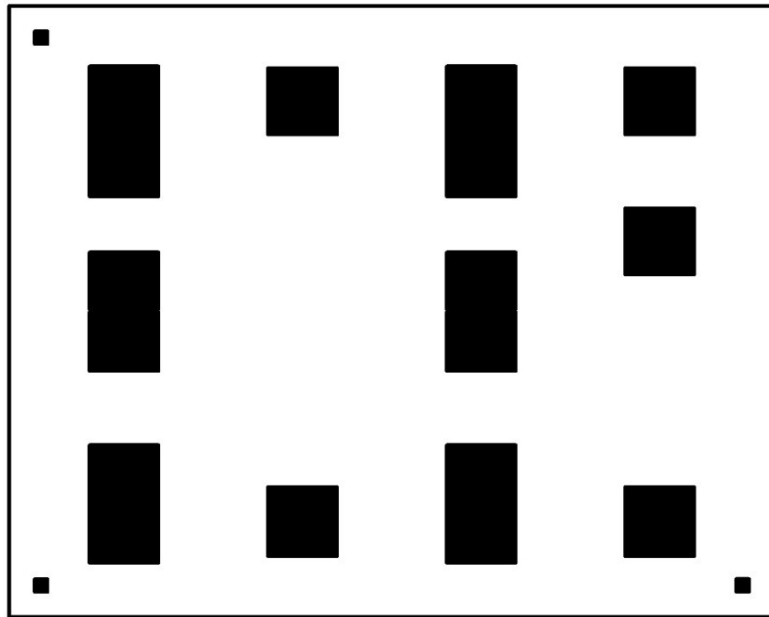
Подп. и дата

Инд. № дробл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.



ИГТУ.454617.001

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Князев		
Пров.		Ушаков		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.		Глушков		

Плата

ТУ-002-00387275-2012

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 3	Листов 7	

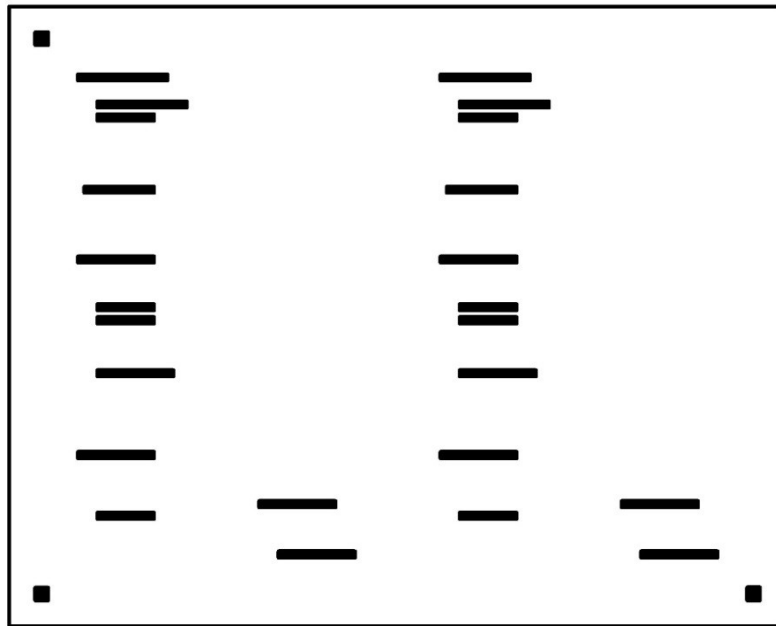
Копировал

Формат А4

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инд. № дробл.

Взам. инд. №

Подп. и дата

Инд. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Князев		
Проб.		Ушаков		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.		Глушков		

ИГТУ.454617.001

Плата

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 4	Листов 7	

ТУ-002-00387275-2012

Копировал

Формат А4

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №

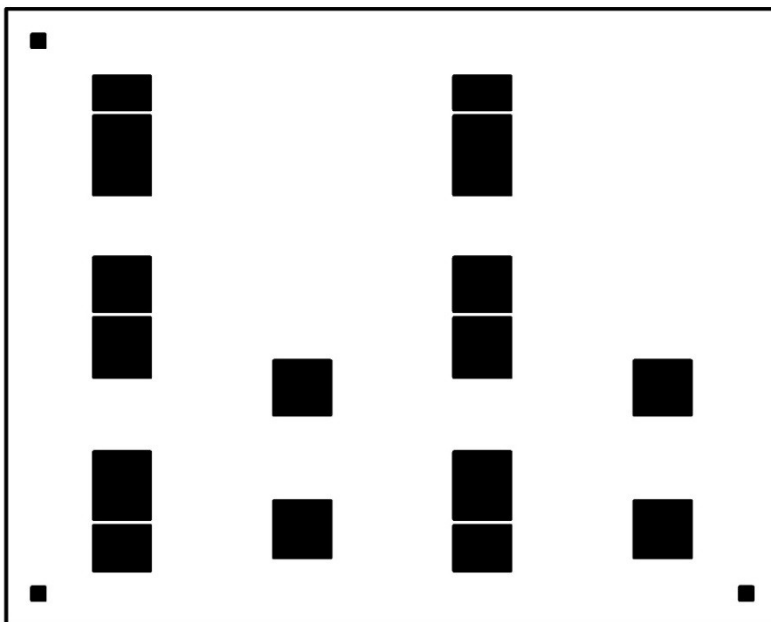
Подп. и дата

Инд. № дудл.

Взам. инд. №

Подп. и дата

Инд. № подл.



ИГТУ.454617.001

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Князев		
Проб.		Ушаков		
Т.контр.				
И.контр.				
Утв.		Глишкова		

Плата

ТУ-002-00387275-2012

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 5	Листов 7	

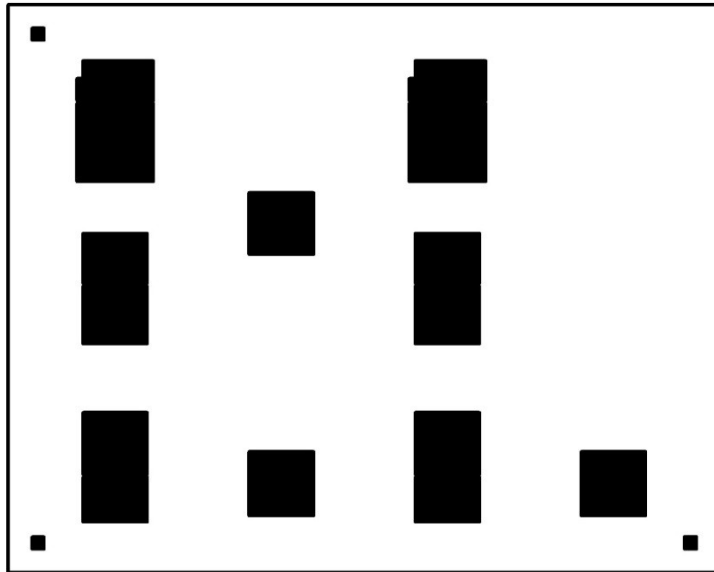
Копировал

Формат А4

ИГТУ.454617.001

Перв. примен.

Справ. №



Подп. и дата

Инд. № дудл.

Взам. инд. №

Подп. и дата

Инд. № подл.

ИГТУ.454617.001

Плата

Лист	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 6		Листов 7

ТУ-002-00387275-2012

Копировал

Формат А4

ИГТУ.454617.001

Перв. примеч.

Стрел. №

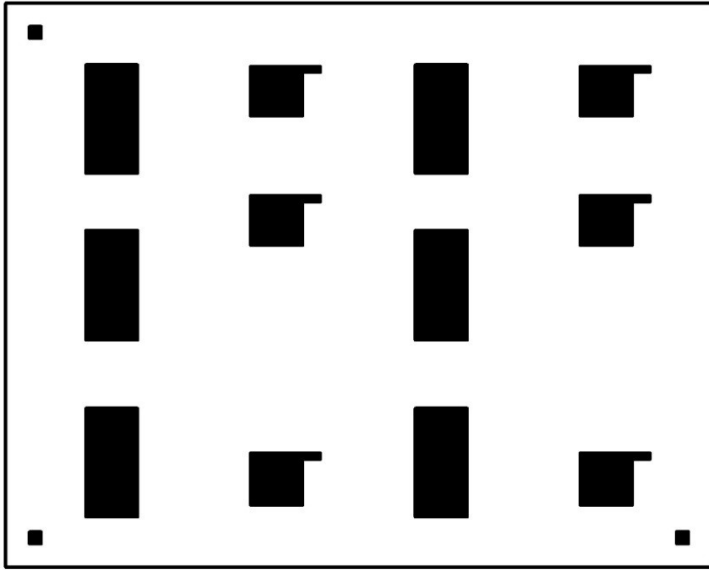
Подп. и дата

Инд. № дораб.

Взам. инд. №

Подп. и дата

Инд. № подл.



ИГТУ.454617.001

Плата

ТУ-002-00387275-2012

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Князев		
Проб.		Ушаков		
Т.контр.				
И.контр.				
Утв.		Глицкий		

Лист	Масса	Масштаб
		2:1
Лист 7	Листов 7	

Копировал

Формат А4