

УДК 537.311.6 (045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-62-71

## К вопросу о выборе алгоритма синтеза элементов с фрактальным импедансом на основе резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами со структурой слоев вида *C-R-NC*

И. В. Князев, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ), имеющие дробно-степенную зависимость импеданса от частоты, могут использоваться для интегрирования дифференциальных уравнений произвольного дробного порядка, которыми чаще всего описываются реальные процессы в природе и технике. В частности, замена интеграторов и дифференциаторов в ПИД-регуляторах систем управления на интеграторы и дифференциаторы дробного порядка позволяет существенно повысить основные параметры систем управления. Однако к настоящему времени коммерческие ЭФИ, которые можно было бы изготавливать в промышленных масштабах, еще не разработаны. Наибольшим потенциалом в этом смысле обладают ЭФИ, построенные на основе многослойных резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами (RC-ЭРП). Один из конструктивных вариантов такого типа ЭФИ со структурой слоев вида R-C-NR изготовлен в виде опытных экземпляров. Но при его изготовлении и испытаниях выявились недостатки, которые могут препятствовать его использованию в проектируемых изделиях.*

*В работе предлагается создавать ЭФИ на основе RC-ЭРП, но со структурой слоев вида C-R-NC, в которых, как предполагается, можно избежать недостатков, отмеченных в ЭФИ со структурой слоев вида R-C-NR. Однако для решения этой задачи требуется выбрать алгоритм синтеза конструкции нового вида ЭФИ, который бы позволял создавать ЭФИ с параметрами не хуже, чем у существующего ЭФИ со структурой слоев вида R-C-NR.*

*С этой целью разработаны и протестированы три программы синтеза, формирующие модели ЭФИ из комбинации двух R-C-NR-линий, используемых в качестве математических моделей RC-ЭРП: синтез на основе алгоритма простого перебора (ПП) вариантов для поиска варианта, обеспечивающего требуемые характеристики ЭФИ; синтез на основе метода роя частиц (МРЧ) и синтез на основе генетического алгоритма (ГА).*

*Результаты исследования показали, что алгоритм ПП для синтеза ЭФИ на основе комбинации из трех и более R-C-NR-линий нецелесообразен из-за громадного количества объектов перебора (порядка  $10^7$ ), а МРЧ недостаточно эффективен для оптимизации дискретной целевой функции. В наибольшей степени отвечает характеру синтезируемого объекта алгоритм синтеза ЭФИ, использующий ГА, как не имеющий ограничений на вид целевой функции, опробованный при решении задач оптимизации в аналогичной предметной области в пространстве большой размерности.*

**Ключевые слова:** элементы с фрактальным импедансом, синтез элементов с фрактальным импедансом, C-R-NC-линия, RC-элемент с распределенными параметрами.

### Введение

Элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ) – это двухполюсные элементы, имеющие зависимость импеданса от частоты вида [1]:

$$\dot{Z}_F = (1 / \omega^\alpha C_\alpha) e^{-j\alpha\pi/2},$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $0 < |\alpha| < 1$ ,  $C_\alpha$  – константа, имеющая смысл псевдоемкости [ $F \cdot c^{(\alpha-1)}$ ] (фрактальная емкость).

Поскольку показатель степени  $\alpha$  частоты  $\omega$  в выражении для фрактального импеданса является не целым числом, то такой пассивный двухполюсник обладает свойствами, которых нет у классических элементов электрических

цепей: резистивного, емкостного и индуктивного.

В частности, фрактальный импеданс (ФИ) характеризуется постоянством фазы фазочастотной характеристики на уровне  $\alpha\pi/2$ , крутизной скатов амплитудно-частотной характеристики, равной  $20\alpha$  дБ/дек., и обеспечивает плавность изменения параметров этих характеристик при плавном изменении  $|\alpha|$  от 0 до 1.

ЭФИ, используемый как фрактальный конденсатор в схемах интеграторов и дифференциаторов на операционных усилителях, позволяет выполнять аналоговые операции интегрирования и дифференцирования произвольного дробного порядка, которые могут существенно

расширить возможности анализа сигналов, формируемых объектами как живой, так и неживой природы (как правило, фрактальных) [2]. 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 устойчивые системы управления, адаптирующиеся к изменениям свойств объекта управления и к внешним помехам в режиме реального времени [3].

В некоторых практических задачах, когда необходимо лишь знание реакции динамической системы на некоторое входное воздействие, широко применяется 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. Именно такая связь характерна для ЭФИ.

Однако, к сожалению, такие уникальные свойства ЭФИ до сих пор не используются в полной мере в науке и технике из-за отсутствия промышленно изготавливаемых ЭФИ.

Проблема создания ЭФИ с заданными и воспроизводимыми характеристиками и параметрами давно занимала специалистов [4]. Достаточно полный обзор конструктивно-технологических вариантов ЭФИ, существующих в настоящее время, их основные характеристики и области применения с некоторыми примерами приведены в (Ушаков П. А., Бабошкин Г. Д., Стойчев С. В., Гравшин В. Г. Двухполюсные элементы с фрактальным импедансом и их применение в радиотехнике и связи. Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 75-105. DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-75-100). Из обзора следует, что наиболее близко отвечают всем требованиям промышленно изготавливаемых ЭФИ элементы на основе многослойной резистивно-емкостной среды с распределенными параметрами (*RC*-ЭПП).

Примером такой реализации является ЭФИ на основе нескольких *RC*-ЭПП со структурой слоев вида *R-C-NR* (резистивный слой *R*, диэлектрик *C*, резистивный слой *NR*), объединенных в единую интегральную конструкцию.

Практическое изготовление образцов ЭФИ со структурой слоев *R-C-NR* и применение их

для создания фрактальных функциональных устройств радиоэлектроники выявило некоторые недостатки таких элементов. Во-первых, при толстопленочной технологии изготовления ЭФИ не удается с заданной точностью выполнить соотношение между удельными сопротивлениями слоев *R* и *NR*. Во-вторых, большинство синтезированных конструкций таких ЭФИ имеют гальваническую связь между выводами элемента, что затрудняет их использование как фрактальных конденсаторов.

На наш взгляд, устранить или существенно уменьшить проявление этих недостатков можно использованием для синтеза ЭФИ *RC*-ЭПП с дуальной 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*.

В работе (Ушаков П. А., Князев И.В. Разработка программы проектирования элементов с фрактальным импедансом на основе *C-R-NC*-структур. Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании». 2020. С. 294–299) была проведена проверка возможности получения элементов, обладающих свойствами ЭФИ, путем объединения в один элемент двух *C-R-NC* ЭПП. При небольшом числе ЭПП эта задача была выполнена путем простого перебора вариантов схем коммутации выводов *C-R-NC* ЭПП и параметрической оптимизации их конструктивных параметров. Однако удалось реализовать ЭФИ лишь с небольшим числом уровней постоянства фазы в диапазоне частот около одной декады.

Целью данной работы является сравнительная оценка и выбор оптимизационного алгоритма для программы синтеза конструкции ЭФИ на новых многослойных *RC*-ЭПП со структурой слоев вида *C-R-NC*.

В качестве альтернативных методов синтеза конструкции ЭФИ будем рассматривать методы случайного поиска, такие как метод роя частиц (МРЧ (PSO)) и генетический алгоритм (ГА).

#### **Конструкция и математическая модель *C-R-NC* ЭПП**

Конструкция *C-R-NC* ЭПП и его условное графическое изображение (УГО) на схемах представлены на рис. 1.

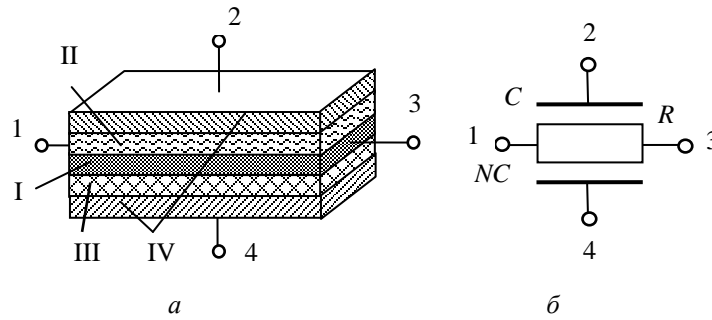


Рис. 1.  $C-R-NC$  ЭРП: а – конструкция; б – УГО элемента

(I – резистивный слой, II – диэлектрик с емкостью  $C$ , III – диэлектрик с емкостью  $NC$ , IV – обкладки)

Для синтеза модели ЭФИ в виде совокупности  $RC$ -ЭРП будем использовать идеализированные математические модели  $C-R-NC$  ЭРП. Для упрощения анализа и синтеза будем полагать, что материалы слоев однородны, длина и ширина  $RC$ -ЭРП на несколько порядков

больше, чем толщины слоев. Поэтому в качестве математической модели  $RC$ -ЭРП можно принять математическую модель  $C-R-NC$ -линии [5], матрица  $y$ -параметров которой имеет вид:

$$\frac{j\omega C}{\theta} \begin{bmatrix} (N+1)T & -P & -(N+1)S & -NP \\ -P & \frac{1}{N+1}(N\theta+2P) & -P & -\frac{N}{N+1}(\theta-2P) \\ -(N+1)S & -P & (N+1)T & -NP \\ -NP & -\frac{N}{N+1}(\theta-2P) & -NP & \frac{N}{N+1}(\theta+2NP) \end{bmatrix},$$

где  $C$  – полная емкость первого диэлектрического слоя,  $R$  – полное сопротивление резистивного слоя,  $N$  – соотношение погонных емкостей второго и первого диэлектрических слоев,  $\theta = \sqrt{j\omega RC(N+1)}$  – постоянная распространения линии,  $P = th(\theta/2)$ ,  $T = 1/th\theta$ ,  $S = 1/sh\theta$ .

Полное сопротивление и емкость линии зависят от длины линии  $L$  и от погонных параметров резистивного и диэлектрического слоев. Предполагается, что ЭФИ будут изготавливаться по интегральной технологии. Поэтому удельные параметры слоев, а также коэффициент  $N$  должны быть одинаковыми для всех  $RC$ -ЭРП, входящих в состав ЭФИ.

### Общие этапы синтеза ЭФИ

Задачей синтеза ЭФИ является поиск схемы коммутации выводов  $C-R-NC$ -линий между собой, определение длин линий ( $L1$ ,  $L2$ ), коэффициента  $N$  и выбор схемы двухполюсного включения получившейся схемы такими, чтобы импеданс двухполюсника имел постоянный уровень в ограниченном диапазоне частот.

Чтобы обеспечить одинаковые условия решения задачи при использовании сравниваемых между собой алгоритмов, условимся, что ЭФИ будет формироваться из двух  $C-R-NC$ -линий (рис. 2).

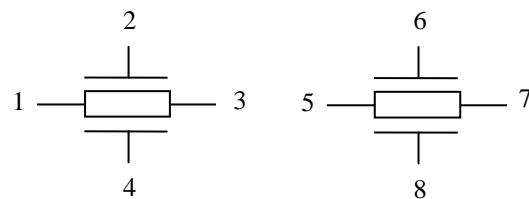


Рис. 2. Исходная схема для синтеза ЭФИ

Для генерации схем включений введем два класса соединений между двумя  $C-R-NC$ -линиями: общие (соединение между линиями) и локальные (соединение внутри одной линии или линия без соединений), представленных в табл. 1.

Таблица 1. Классы соединений для генерации схем

Общие	Локальные

Любой вариант схемы соединений получается сложением общего и локального класса соединений, как это показано на рис. 3, после

чего один или два свободных контакта, кроме 1 и 7, соединяем с землей, как это показано на рис. 4.

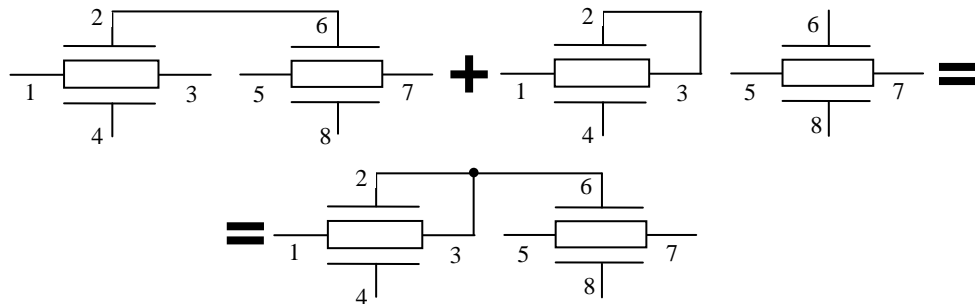


Рис. 3. Пример формирования схемы коммутации

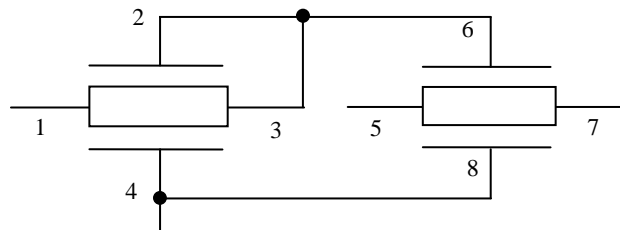


Рис. 4. Пример сформированной схемы коммутации

Для программы схему коммутаций, представленную на рис. 4, можно выразить через матрицы инцидентности, такими матрицами

в нашей программе будут: матрица узлов, соединенных с землей (GND) размерностью  $1 \times 8$ , матрица неиспользуемых контактов (FLOAT)

размерностью  $1 \times 8$  и матрица соединений (CON) размерностью  $8 \times 8$ :

$$GND = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1],$$

$$FLOAT = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0],$$

$$CON = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

### Алгоритм синтеза ЭФИ с последовательным перебором вариантов

Алгоритм заключается в следующем: 1) последовательно анализируются все сгенерированные варианты схем включения и при заданных начальных значениях  $L1$ ,  $L2$ ,  $N$ ,  $C_{\text{пор}}$ ,  $R_{\text{пор}}$  вычисляются ФЧХ импеданса; 2) выбираются решения с лучшими значениями целевой функции; 3) выполняется оптимизация по критерию максимума целевой функции в пространстве параметров  $L1$ ,  $L2$ ,  $N$ ; 4) результат с максимальным значением функции фитнеса выводится в окно результатов.

Для оценки времени работы программы было выполнено 10 запусков с различными требованиями к целевой функции. В результате, среднее время работы программы составило 65,558 секунды. Основные параметры компьютера, на котором проводились запуски программы, следующие: процессор Intel Pentium N3700, оперативная память DDR3 1333 МГц SDRAM 8 Гб. Время анализа одной схемы составило 0,5 с.

### Алгоритм синтеза ЭФИ методом роя частиц (МРЧ)

Метод роя частиц (МРЧ) – это эвристический метод оптимизации в вычислительной технике, предложенный Эберхартом и Кеннеди в 1995 г. [6]. В основе алгоритма лежат модели группового поведения стаи птиц и насекомых.

В МРЧ все сгенерированные варианты схем коммутации представляют собой «частицы», которые нумеруются и представляются в виде одномерного вектора  $[1, n]$ . Чтобы ускорить процесс поиска, был сгенерирован рой, состоящий из 10 частиц со случайными номерами, взятыми из одномерного массива, которым

присваиваются случайные скорости от 0 до 3 (целые значения).

Во время процедуры поиска схемы коммутации частицы меняют свое положение и скорость, исходя из своего опыта и опыта других частиц. В результате, частица тянется как к другим частицам роя, так и к лучшему местоположению, при этом они оценивают качество своего текущего местоположения в процессе оптимизации. Подобный процесс изменения скорости достигается благодаря следующей формуле:

$$v(i+1) = w \cdot v(i) + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{\text{best}}(i) - x(i)) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_{\text{best}}(i) - x(i)),$$

где  $v(i)$  – скорость частицы на шаге  $i$ ;  $x(i)$  – положение частицы на шаге  $i$ ;  $w$  – инерционный вес;  $c_1$ ,  $c_2$  – когнитивные и социальные коэффициенты соответственно;  $p_{\text{best}}(i)$  – лучшая позиция, найденная агентом при его собственных передвижениях до  $i$ -го шага;  $g_{\text{best}}(i)$  – лучшая позиция, обнаруженная всем роем;  $\text{rand}()$  – генератор случайных чисел от 0 до 1.

Более подробно про параметры вычисления скорости можно найти в [7].

Для вычисления положения частицы по ее скорости применяется классическая формула из кинематики для равномерного равноускоренного движения:

$$x(i+1) = x(i) + v(i+1) \cdot \Delta t,$$

где  $x(i)$  – текущая позиция частицы на шаге  $i$ , а  $\Delta t$  – единичный интервал времени, который в нашем случае равен единице.

Перед запуском МРЧ должны быть определены три параметра, участвующих в обновлении скорости: инерционный вес ( $w$ ) – параметр, регулирующий быстроту возрастания скорости, социальная скорость ( $c_2$ ) – коэффициент, указывающий на скорость притяжения частиц к лучшему местоположению роя, и когнитивная скорость ( $c_1$ ) – коэффициент, указывающий на скорость притяжения к локальной лучшей позиции каждой из частиц. В данной работе эти параметры были определены следующим образом: инерционный вес – 0,1; социальная скорость – 2 и когнитивная скорость – 0,5.

Граничное условие в МРЧ заключалось в том, чтобы частица не вылетала за заданные пределы. Данное условие выполняется в двух случаях, если линия координат закольцована или если частицы отражаются от границ зоны определения. В нашей работе мы использовали свойство закольцованности линии координат,

то есть частица, вылетая с конца зоны определения, возвращалась в начало координат и наоборот.

Блок-схема работы программы представлена на рис. 5.

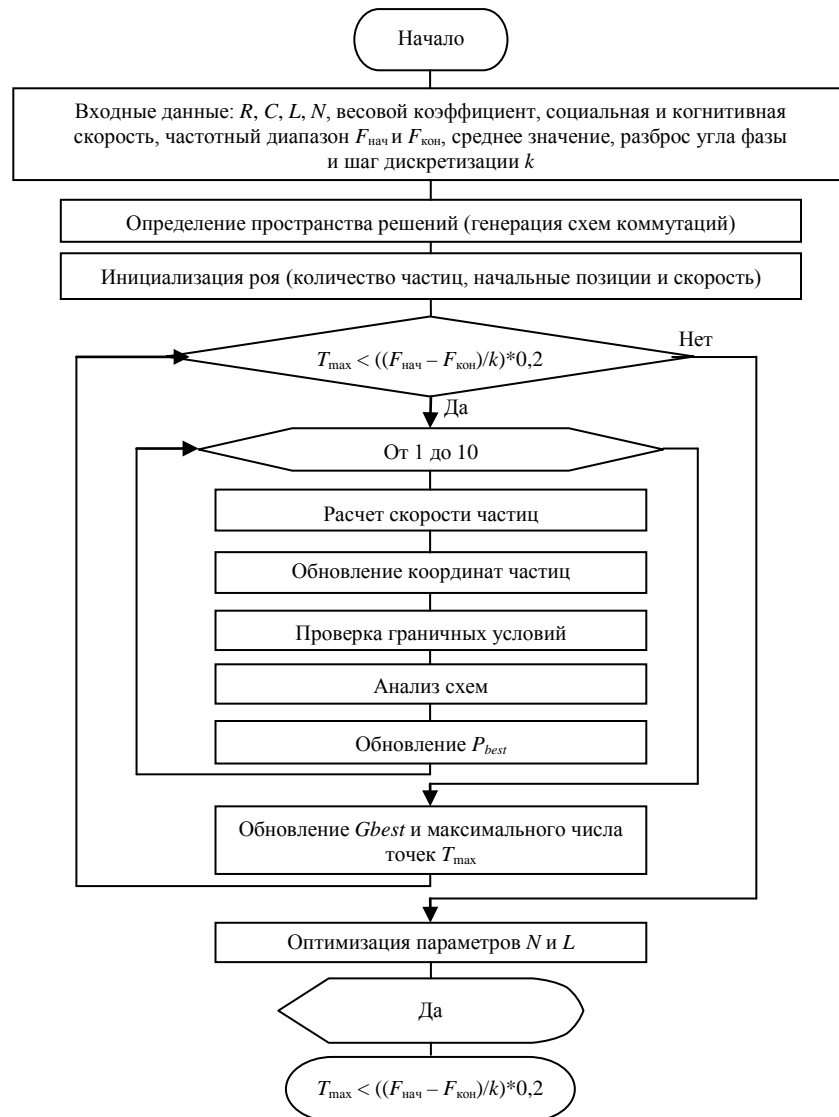


Рис. 5. Блок-схема программы синтеза на основе МРЧ

При 10 запусках программы среднее время получения решения составило 63,938 секунды.

#### Алгоритм синтеза ЭФИ с помощью генетического алгоритма

Генетический алгоритм (ГА) – это, как и метод роя частиц, эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Для оптимизации используются естественные методы эволюции, такие как наследование, мутации, отбор и кроссинговер (процесс обмена участками хромосом) [8].

При выбранном методе генерации особей (табл. 1) можно заметить, что хромосома каждой особи будет состоять из двух генов, один из которых соответствует номеру из класса общих соединений, а второй – номеру из класса локальных соединений. Для установления равных условий с МРЧ создадим исходное поколение из 10 особей, сгенерированных случайным образом.

После анализа запомним лучший результат схемы коммутации и полученную функцию полезности. Далее произведем отбор родительских особей методом ранжирования, т. е. проанализированные особи построим в ряд по убыванию функции полезности.

В процессе скрещивания (кроссовера) гены родителей передавались двум потомкам, а некоторые гены в хромосомах выбирались из базы соединений случайным образом (мутация). Используя подобные операции, были получены от двух родителей два потомка. Скрещиванию подвергались 8 особей популяции, оставшиеся

две особи, с наихудшими показаниями функции полезности, отсеивались, и вместо них генерировались новые особи.

Блок-схема работы программы с ГА с учетом оптимизации лучшего решения по параметрам  $L$  и  $N$  представлена на рис. 6.

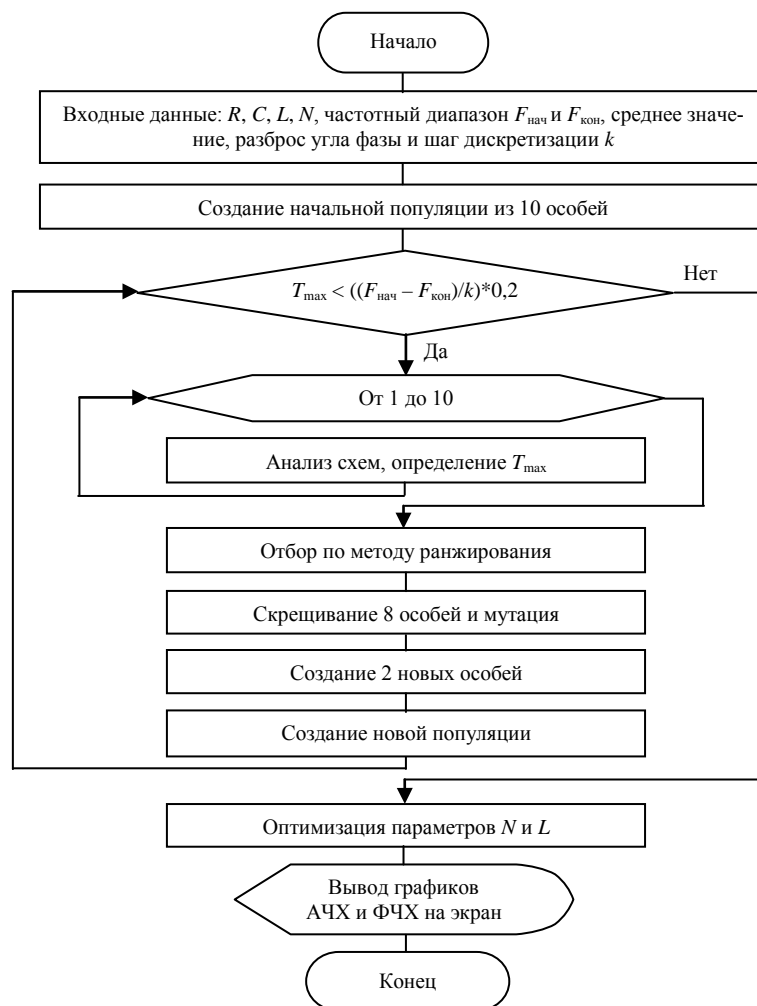


Рис. 6. Блок-схема программы синтеза на основе генетического алгоритма

После 10 запусков программы среднее время решения задачи составило 57,155 с.

#### Анализ результатов

Результаты проведенных компьютерных экспериментов показывают, что среднее время работы каждой из трех программ примерно одинаково. Это связано с тем, что база вариантов схем коммутации двух  $C-R-NC$ -линий при заданном способе генерации равна 30.

Для принятия решения оценим потенциальное количество схем коммутаций в базе при четырех  $C-R-NC$ -линий.

Для начала необходимо вычислить общее количество схем коммутаций между двумя  $C-R-NC$ -линиями при условии, что должна быть

хотя бы одна связь между двумя линиями и хотя бы один вывод заземлен.

Далее для простоты вычислений разобьем все схемы коммутаций на классы по количеству свободных выводов, так как от их количества зависит количество вариантов выводов, которые могут быть соединены с «землей». Из рис. 2 видно, что количество «плавающих» выводов будет варьироваться от 1 до 4.

Проведем расчеты вариантов подключения «земли» при разном количестве «плавающих» контактов. Для вычисления воспользуемся формулой сочетаний без повторений  $C_k^n$  из комбинаторики [9]. Формулы и результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет количества вариантов подключения «земли»

Количество «плавающих» контактов, шт.	Формула для вычисления	Количество вариантов
1	$C_1^1 = \frac{1!}{(1!(1-1)!)}$	1
2	$\sum_{n=1}^2 C_2^n = \sum_{n=1}^2 \frac{2!}{n!(2-n)!}$	3
3	$\sum_{n=1}^3 C_3^n = \sum_{n=1}^3 \frac{3!}{n!(3-n)!}$	7
4	$\sum_{n=1}^4 C_4^n = \sum_{n=1}^4 \frac{4!}{n!(4-n)!}$	15

Затем вычислим количество вариантов соединений двух *C-R-NC*-линий при числе «плавающих» контактов от 1 до 4. Для вычислений воспользуемся той же формулой из комбинаторики, что и при вычислении количества вариантов установки «земли». Формулы и результаты вычислений представлены в табл. 3.

Следовательно, общее количество схем коммутаций между двумя *C-R-NC*-линиями равно 342.

Таблица 3. Расчет количества вариантов схем коммутаций

Кол-во «плавающих» контактов, шт.	Формула для вычисления	Кол-во вариантов коммутаций без учета «земли»	Кол-во вариантов коммутаций с учетом «земли»
1	$(C_6^2 - 2 \cdot C_3^2) + (C_4^2 - 2 \cdot C_2^2) + 2 \cdot C_2^2$	15	15·1=15
2	$(C_6^2 - 2 \cdot C_3^2) + (C_4^2 - 2 \cdot C_2^2) + (C_6^2 - 2 \cdot C_3^2) \cdot (C_3^2 - 2)$	22	22·3=66
3	$(C_6^2 - 2 \cdot C_3^2) + (C_3^2 - 1)$	18	7·18=126
4	$C_6^2 - 2 \cdot C_3^2$	9	9·15=135
ИТОГО:			342

Так как в дальнейшем для синтеза ЭФИ планируется использовать не две *C-R-NC*-линии, а четыре, то число комбинаций будет рассчитываться с помощью метода комбинаторики из раздела задачи о числе размещений с повторениями:

$$\bar{A}_n^k = n^k = 342^3 = 4 \cdot 10^7,$$

где  $k$  – количество межэлементных связей, а  $n$  – число комбинаций для одной межэлементной связи.

Учитывая, что время анализа одной схемы коммутации методом перебора составляет порядка 0,5 с, то можно оценить время анализа ЭФИ из четырех *C-R-NC*-линий, которое составит около 462 дней. Таким образом, синтез ЭФИ с приемлемыми характеристиками методом перебора вариантов не имеет смысла.

Для задач с большим количеством вариантов решений необходимы многопараметрические методы оптимизации (эволюционные алгоритмы). В эволюционных алгоритмах отсутствуют сведения об экстремальном значении целевой функции, поэтому пользователь принимает полученный результат за оптимальный, хотя возможности дальнейшего улучшения решения далеко не исчерпаны.

МРЧ обладает одним существенным преимуществом по сравнению с ГА – в МРЧ используется только один оператор для каждой итерации, а именно обновления скорости, вместо трех основных, необходимых в ГА (скрещивание, мутация и отбор). Однако в ходе работы по созданию программы синтеза на основе МРЧ обнаружили серьезные недостатки. Во-первых, до запуска основного алгоритма необходимо создать все поле вариантов возможных решений, что потребует довольно много времени и большой объем памяти для хранения этого массива. Во-вторых, МРЧ позволяет эффективно находить экстремум непрерывной функции, но в нашем случае целевая функция имеет дискретный характер. Как показано в работе [10], при решении задач с дискретными значениями малой размерности МРЧ обеспечивает получение приемлемых решений, однако с ростом размерности как качество решений, так и вероятность получения оптимального решения существенно снижаются. Следовательно, МРЧ характеризуется низкой эффективностью и не рекомендуется для практического решения задач, в которых целевая функция является дискретной.

Отличие от МРЧ ГА отличает пригодность для поиска в сложном пространстве решений



большой размерности, отсутствие ограничений на вид целевой функции, возможность проблемно-ориентированного кодирования решений, возможность комбинирования эволюционных вычислений с не эволюционными алгоритмами и др. (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).

### Заключение

Таким образом, учитывая полученный в работе опыт создания и тестирования трех разных по принципу действия программ синтеза ЭФИ на основе комбинации C-R-NC-линий, а также анализ литературы, можно сделать следующие выводы.

Алгоритм синтеза ЭФИ, основанный на простом переборе возможных вариантов схем коммутации C-R-NC-линий, теряет смысл уже при числе коммутируемых линий более трех.

Алгоритм синтеза ЭФИ, использующий МРЧ, нельзя считать оптимальным из-за необходимости достаточно полного описания области возможных решений и наличия ограничений на вид целевой функции.

В наибольшей степени отвечает характеру синтезируемого объекта алгоритм синтеза ЭФИ, использующий ГА, как не имеющий ограничений на вид целевой функции, опробованный при решении задач оптимизации в аналогичной предметной области в пространстве большой размерности.

### Библиографические ссылки

1. Elwakil A. S. Fractional-order circuits and systems: an emerging interdisciplinary research area, IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 10, no. 4, 2010. P. 40-50.
2. Tsirimokou G., Psychalinos C., Elwakil A. Design of CMOS Analog Integrated Fractional-Order Circuits, Applications in Medicine and Biology, Springer Int. Publishing, 2017.
3. Monje C., Chen Y., Vinagre B., Xue D., Feliu V. Fractional Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications. Springer, London (2010). ISBN: 978-1849963343.
4. Фрактальные элементы: пионерские конструктивно-технологические реализации / под общ. ред. д.т.н. А. Х. Гильмутдинова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2020. 640 с. ISBN 978-5-9221-1898-9.
5. Happ W.W., Castro P.S., Fuller W.D. Synthesis of solid state distributed parameter functions. Sunnyvale, California 1962, pp. 262-278.
6. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Neural

Networks IV. 1995. P. 1942-1948. Doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

7. Robinson J. and Rahmat-Samii Y. Particle Swarm Optimization in Electromagnetics, IEEE Trans. Antennas Propag., Feb. 2002, vol. 52, no.2, pp. 397-407.

8. Goldberg D. E. Genetic algorithms and machine learning / D. E. Goldberg, J. H. Holland // Machine learning. 1988. Vol. 3. Is. 2–3. Pp. 95–99. DOI: 10.1023/A:1022602019183.

9. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику / пер. с фр. М. : Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1975. 480 с.

10. Ватутин Э. И., Титов В. С. Исследование особенностей применения метода роя частиц в задаче поиска кратчайшего пути в графе при наличии ограничений // Вестник компьютерных и информационных технологий. М. : Спектр, 2017. С. 26–34.

### References

1. Elwakil A.S. Fractional-order circuits and systems: an emerging interdisciplinary research area, IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 10, no. 4, 2010. P. 40-50.
2. Tsirimokou G., Psychalinos C., Elwakil A. Design of CMOS Analog Integrated Fractional-Order Circuits, Applications in Medicine and Biology, Springer Int. Publishing, 2017.
3. C. Monje, Y. Chen, B. Vinagre, D. Xue, V. Feliu, Fractional Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications. Springer, London (2010). ISBN: 978-1849963343.
4. *Fraktalnyye elementy: pionerskiye konstruktivno-tehnologicheskiye realizatsii* [Fractal elements: pioneering constructive and technological implementations]. Editor DSc in Engineering A.Kh. Gilmutdinova. Moscow: FIZMATLIT, 2020. P. 640. ISBN 978-5-9221-1898-9 (in Russ.).
5. Happ W.W., Castro P.S., Fuller W.D., Synthesis of solid state distributed parameter functions. Sunnyvale, California 1962, pp. 262-278.
6. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Neural Networks IV. 1995. P. 1942-1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
7. Robinson J. and Rahmat-Samii Y., Particle Swarm Optimization in Electromagnetics, IEEE Trans. Antennas Propag., Feb. 2002, vol. 52, no.2, pp. 397-407.
8. Goldberg D.E. Genetic algorithms and machine learning / D. E. Goldberg, J. H. Holland // Machine learning. 1988. Vol. 3. Is. 2–3. Pp. 95–99. DOI: 10.1023/A:1022602019183.
9. Kaufmann A. *Vedeniye v prikladnuyu kombinatoriku. Perevod s frantsuzskogo*. [An introduction to applied combinatorics. Translated from French]. Moscow: Publishing house Nauka, Main editorial office of physical and mathematical literature, 1975. P. 480 (in Russ.).
10. Vatutin E.I., Titov V.S. *Issledovaniye osobennostey primeneniya metoda roya chastits*

*v zadache poiska kratchayshego puti v grafe pri nalichii ogranicheniy.* [Investigation of the peculiarities of the application of the particle swarm method in the problem of finding the shortest path in a graph with restrictions].

Bulletin of computer and information technologies. Publishing "Spectrum" (Moscow). 2017. Pp. 26-34 (in Russ.).

\*\*\*

### **On the Choice of Algorithm for Synthesis of Elements with Fractal Impedance Based on Resistive-capacitive Elements with Distributed Parameters with the Layer Structure of the C-R-NC Type**

*I. V. Knyazev*, Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*P. A. Ushakov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Elements with a fractal impedance (FOE) having a fractional-power dependence of impedance on frequency can be used to integrate differential equations of arbitrary fractional order, which most often describe real processes in nature and technology. In a particular case, when replacing integrators and differentiators in PID controllers of control systems with fractional integrators and differentiators, it can greatly increase the basic parameters of control systems. However, to date, commercial FOEs that could be produced on an industrial scale have not been developed yet. The greatest potential in this sense is possessed by FOEs built on the basis of multilayer resistive-capacitive elements with distributed parameters (RC-EDP). One of the constructive variants of this type of FOE with a layer structure of the R-C-NR type was made as sample prototypes. But during its manufacture and testing, shortcomings were revealed that could impede its use in designed products.*

*In this work, it is proposed to create the FOE with a layer structure of the C-R-NC type, in which it is possible to avoid the disadvantages of the FOE with a layer structure of the R-C-NR type. However, to solve this problem, it is necessary to choose a synthesis algorithm that will make it possible to create the FOE with similar or better parameters than that of the existing FOE with a layer structure of the R-C-NR type.*

*For this purpose, three synthesis programs have been developed and tested, forming FOE models from a combination of two R-C-NR lines used as mathematical models of RC-EDP: synthesis based on a simple enumeration (SE) algorithm with options that provide the required FOE characteristics, particle swarm optimization (PSO), and genetic algorithm (GA) synthesis.*

*The results of the study showed that the SE algorithm for the synthesis of FOE based on a combination of three or more R-C-NR elements is inexpedient due to the huge number of enumeration objects (about  $10^7$ ), and the PSO is not effective for optimizing a discrete objective function. GA meets the parameters of the synthesized object better than others, since it has no restrictions on the form of the objective function and has already been used to solve optimization problems in a similar subject area with a high-dimensional space.*

**Keywords:** fractal impedance elements, synthesis of elements with fractal impedance, C-R-NC-line, RC- element with distributed parameters.

Получено: 26.03.2021