

УДК 621.372.54.061

П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

К. О. Максимов, соискатель, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## РАЗРАБОТКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИЙ ФРАКТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОЙ СРЕДЫ СО СТРУКТУРОЙ СЛОЕВ ВИДА $R-C-NR$

Рассмотрены вопросы кодирования информации о конструктивных, технологических и схемотехнических параметрах фрактально-го элемента на основе пленочной многослойной резистивно-емкостной среды, обеспечивающих проведение генетических операций ГА. Разработан алгоритм синтеза конструкций фрактальных элементов на основе ГА и показаны результаты синтеза, полученные с помощью созданной авторами программы синтеза.

**Ключевые слова:** RC-элемент с распределенными параметрами, фрактальный элемент, генетический алгоритм.

Под фрактальными элементами в настоящее время понимают электрические двухполюсники, импеданс которых имеет постоянный фазовый сдвиг  $\varphi_Z = \alpha\pi/2$  ( $0 < \alpha < 1$ ) в ограниченном диапазоне частот [1].

Из всех известных в настоящее время конструктивно-технологических вариантов фрактальных элементов наиболее перспективным с точки зрения внедрения в производство в промышленных масштабах является пленочная многослойная структура «резистор – диэлектрик – резистор», представляющая собой резистивно-емкостной элемент с распределенными параметрами ( $R-C-NR$  ЭРП). Однако одномерный однородный (ОО)  $R-C-NR$  ЭРП имеет  $\alpha = 0,5$ , что существенно снижает возможности практического применения фрактальных элементов. Поэтому в [2] предложен способ конструирования фрактальных элементов с произвольным значением  $\alpha$  путем комбинации ОО  $R-C-NR$  ЭРП, каждый из которых может иметь собственный набор конструктивных и технологических параметров.

Практика показывает, что наилучшим путем решения этой задачи является генетический алгоритм (ГА) поисковой оптимизации [2]. В данной работе рассмотрены вопросы кодирования информации о конструктивных, технологических и схемотехнических параметрах фрактального элемента, обеспечивающих проведение генетических операций ГА, разработан алгоритм синтеза конструкций фрактальных элементов на основе ГА и показаны результаты синтеза, полученные с помощью созданной авторами программы синтеза.

Пусть задача конструирования фрактального элемента состоит в том, чтобы найти такую схему коммутации четырех четырехполюсников (рис. 1, б) с известными выражениями их  $u$ -параметров, такие конструктивные и технологические параметры соответствующих им ОО  $R-C-NR$  ЭРП (рис. 1, а), такую схему двухполюсного включения получившегося четырехполюсника, чтобы обеспечить заданное значение  $\alpha$  в заданном диапазоне частот.

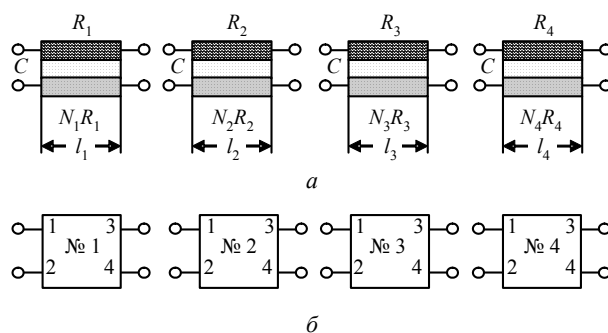


Рис. 1. Конструктивная (а) и схемотехническая (б) базы для синтеза фрактальных элементов по заданному значению  $\alpha$  и заданному диапазону частот

В соответствии с рис. 1, а все конструктивные и технологические параметры, которые полно и однозначно описывают конструкцию  $R-C-NR$  ЭРП, можно представить множеством  $\mathbf{P} = \{\mathbf{R}, \mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{N}\}$ , где  $\mathbf{R}$  – множество возможных значений сопротивлений  $R_i$  первого резистивного слоя;  $\mathbf{C}$  – множество возможных емкостей  $C_i$  между резистивными слоями;  $\mathbf{L}$  – множество допустимых длин  $l_i$ ;  $\mathbf{N}$  – множество допустимых коэффициентов  $N_i$ , определяющих соотношение сопротивлений первого и второго резистивного слоев базовых элементов конструкции фрактального элемента.

Учитывая, что  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{C}$  не влияют на форму и значения модуля и фазы частотной характеристики импеданса синтезируемого фрактального элемента, а лишь определяют рабочие частоты элемента, их можно исключить из варьируемых параметров и задать в конце синтеза для обеспечения заданного частотного множителя. Тогда информацию о параметрах  $N_i$  и  $l_i$   $i$ -й особи в популяции базовых наборов, состоящих из четырех ОО  $R-C-NR$  ЭРП, можно записать в матричной форме как

$$Pchr_i = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \\ l_1 & l_2 & l_3 & l_4 \end{bmatrix},$$

которую на языке, используемом в описании генетических алгоритмов, можно назвать *P-хромосомой*, а каждый столбец ее является *геном*.  $N_i$  и  $l_i$  – вещественные положительные числа, которым в процессе выполнения ГА присваиваются значения из диапазона значений, задаваемых на основе конструктивно-технологических ограничений, определяемых принятой технологией изготовления *RC-ЭРП*.

Более сложной задачей является выбор способа кодирования схемы соединений базовых четырехполюсников, позволяющий выполнять генетические операции (мутации, скрещивание).

С этой целью рассмотрим все возможные варианты соединений между двумя соседними четырехполюсниками, приведенные в виде матрицы на рис. 2.

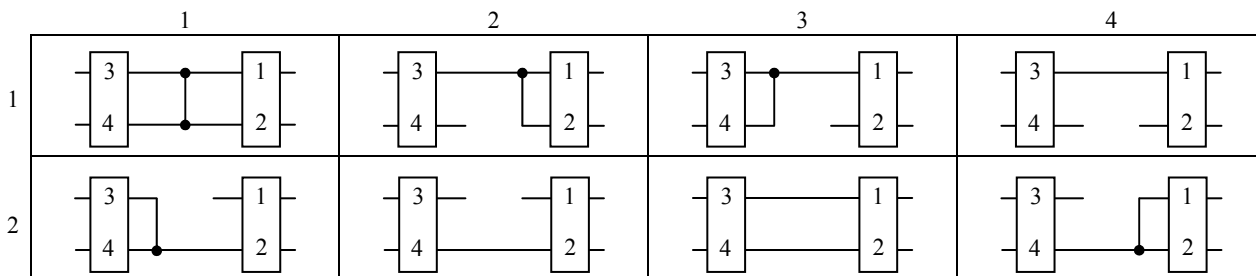


Рис. 2. Возможные схемы соединений между соседними четырехполюсниками

Каждой ячейке этой матрицы можно сопоставить матрицу инцидентий, набор которых определяется массивом матриц, изображенных на рис. 3.

	1	2	3	4
1	1 1 1 1	1 1 1 0	1 0 1 1	1 0 1 0
1	1 1 1 1	1 1 1 0	0 1 0 0	0 1 0 0
1	1 1 1 1	1 1 1 0	1 0 1 1	1 0 1 0
1	1 1 1 1	0 0 0 1	1 0 1 1	0 0 0 1
2	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 1 0	1 1 0 1
2	0 1 1 1	0 1 0 1	0 1 0 1	1 1 1 0
2	0 1 1 1	0 0 1 0	1 0 1 0	0 0 1 0
2	0 1 1 1	0 1 0 1	0 1 0 1	1 1 1 0

Рис. 3. Матрицы инцидентий, соответствующие схемам соединений, изображенных на рис. 2

Таким образом, информация о схеме соединений *i*-й особи популяции может быть записана как

$$E_i = \{E_{1i}, E_{2i}, E_{3i}\},$$

где  $E_{ji} = \{c_j, r_j\}$ ,  $c$  – номер столбца матрицы соединений (рис. 2),  $c = [1, 4]$ ;  $r$  – номер строки матрицы соединений,  $r = [1, 2]$ ; индексы при  $r$  и  $c$  – номер пары соединяемых четырехполюсников (слева направо на рис. 1, б);  $j = [1, 3]$ .

Для каждого варианта схемы соединений базовых четырехполюсников формируется глобальная матрица инцидентий **I**, на основе которой формируется глобальная матрица  $u$ -параметров фрактального элемента.

Для увеличения разнообразия характеристик особей в популяции можно ввести генетическую операцию, которой нет аналогов в стандартных ГА, – соединение одного или нескольких узлов схемы с общей точкой схемы. Для выполнения этой операции в ГА для каждой пары соединяемых четырехполюсников формируется нулевая матрица–столбец четвертого порядка. Запись в одну или несколько ячеек этой матрицы значения 1 будет соответствовать соединению узлов с номерами, соответ-

ствующими номерам этих ячеек, к общей точке схемы. Совокупность этих матриц образует множество  $A = \{A_1, A_2, A_3\}$  где  $A_i$  – матрицы–столбцы, примеры формирования которых показаны на рис. 4.

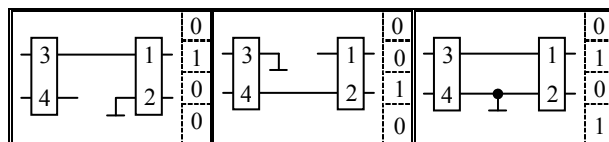


Рис. 4. Примеры кодирования элементов множества **A**

Тогда информация о схемах соединений смежных четырехполюсников *i*-й особи популяции образует *S*-хромосому:

$$Schr_i = \{([E_{1i}], [A_{1i}]); ([E_{2i}], [A_{2i}]); ([E_{3i}], [A_{3i}])\}.$$

На основе значений генов в *P*-хромосомах каждой особи вычисляются значения  $u$ -параметров соединяемых четырехполюсников, а на основании *S*-хромосом составляется глобальная  $Y$ -матрица размером  $12 \times 12$ , которая приводится к матрице  $4 \times 4$  путем исключения всех внутренних узлов схемы соединений.

Поскольку фрактальный элемент представляет собой двухполюсник, то следующей задачей синтеза является автоматизированный выбор схемы двухполюсного включения полученного результирующего четырехполюсника.

Очевидно, что любой из внешних узлов четырехполюсника может иметь следующие состояния: входной узел (*in*), заземленный узел (*gnd*), соединенные между собой узлы (*con*), незадействованные (плавающие) узлы (*float*). Для выполнения ГА относительно внешних выводов сформируем нулевую матрицу размером  $4 \times 4$ , в которой каждая строка соответствует одному из указанных состояний вывода, а каждый столбец – номеру вывода. Запись значения 1 в одну из ячеек матрицы с координатами  $i, j$  соответствует присвоению *i*-выводу *j*-го состояния. При

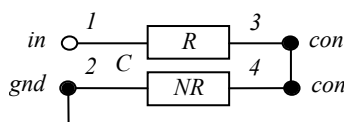
этом для физической реализуемости схемы необходимо придерживаться следующих правил формирования элементов этой матрицы:

- обязательно наличие хотя бы одного узла с состоянием *in*;
- обязательно наличие хотя бы одного узла с состоянием *gnd*;
- число узлов с состоянием *con* не может быть меньше двух.

Пример формирования матрицы состояний внешних узлов четырехполосника (матрица  $B_i$ ), сводящих его к двухполоснику, показан на рис. 5.

$$B_i = \begin{bmatrix} in1 & in2 & in3 & in4 \\ gnd1 & gnd2 & gnd3 & gnd4 \\ float1 & float2 & float3 & float4 \\ con1 & con2 & con3 & con4 \end{bmatrix}$$

a



б

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

в

Рис. 5. Элемент множества **B**: a – структура матрицы; б – пример кодирования

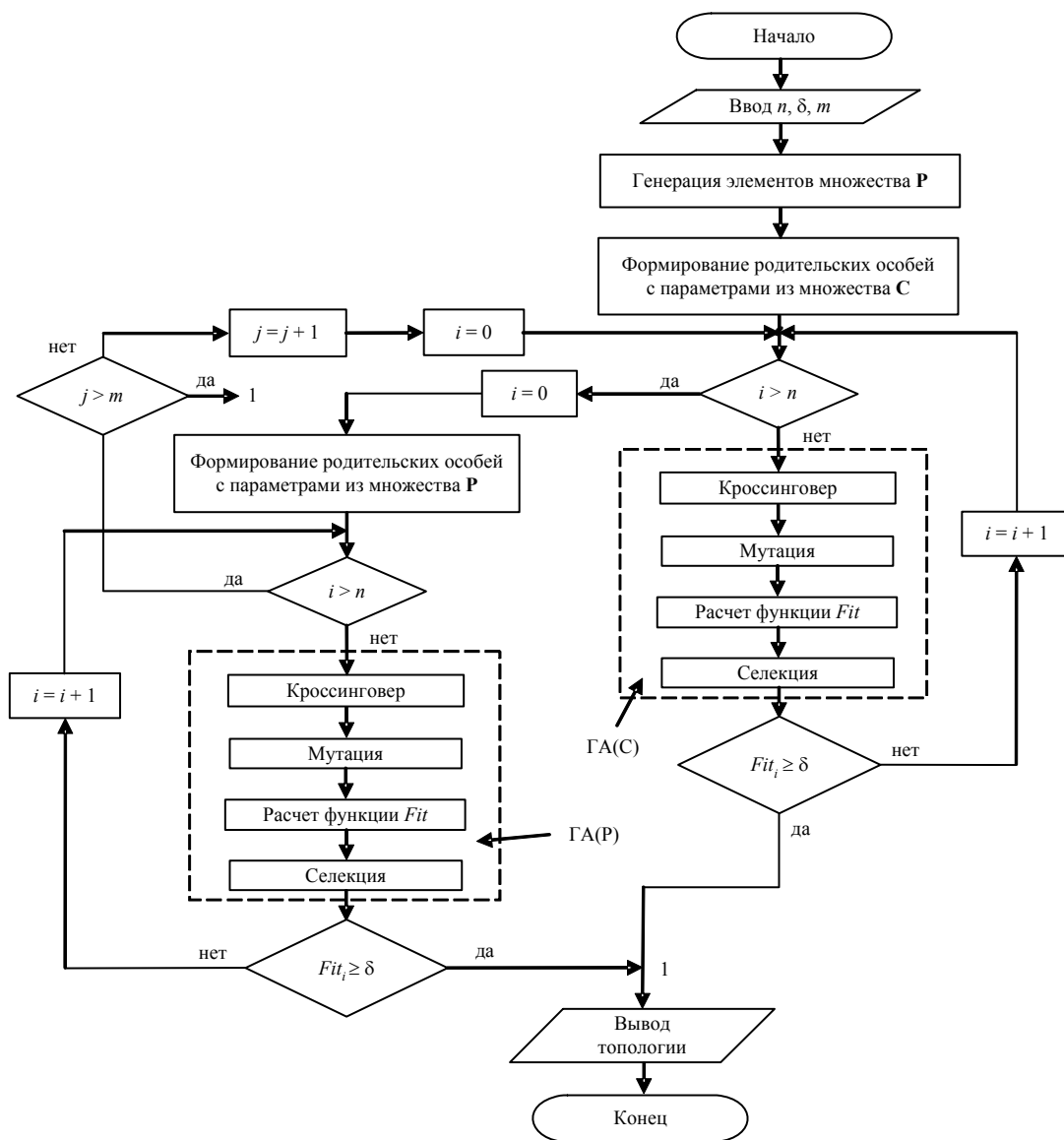


Рис. 6. Блок-схема генетического алгоритма синтеза фрактального элемента

На начальной стадии ГА случайным образом генерируется небольшое число (не более 10)  $RC$ -ЭПП на основе четырех  $OO R - C - NR$  ЭПП, которые составляют начальную популяцию.

Затем выполняется генетический алгоритм, в котором варьируются схемотехнические параметры ГА(С) для поиска оптимального сочетания схем внутренних связей и внешнего включения  $R - C - NR$  ЭПП. Этот алгоритм прекращает свою работу либо при достижении функцией  $Fit$  некоторого порогового значения  $\delta$ , либо после выполнения заданного количества итераций  $n$ .

Вслед за этим (при фиксированных элементах множества С) выполняется ГА(Р) – генетический алгоритм, в котором варьируются только конструктивные и технологические параметры. Если заданное пороговое значение  $\delta$  на этой стадии еще не достигнуто, то вновь выполняется ГА(С). Такая последовательная оптимизация продолжается заданное число циклов  $m$ .

Функция пригодности  $Fit$  определяется как число отсчетов фазочастотной характеристики испытуемой особи в заданном интервале частот, выходящих за пределы прямоугольного окна, задающего требования к фазочастотной характеристике синтезируемого фрактального элемента.

В данном ГА используется односточный оператор кроссинговера со случайным выбором точки кроссинговера. Родительскую пару представляют в виде двух массивов  $C_A$  и  $C_B$  либо  $P_A$  и  $P_B$  в зависимости от этапа ГА: ГА(Р) или ГА(С). Дочерняя пара образуется в результате взаимного обмена генов, находящихся справа от точки кроссинговера (более подробно см. [2]).

Оператор мутации заключается в замене одного или нескольких значений генов родительской особи значениями, выбранными случайным образом из диапазона допустимых. Это обеспечивает поддержание достаточного разнообразия генетического материала популяции.

Тип оператора селекции – предпочтительный выбор пар по лучшим значениям функции фитнеса. В этом случае с вероятностью

$$p_k = \frac{(1 / Fit(w_k^t))}{\sum_{i=1}^r Fit(w_i^t)}, \quad k = \overline{1, r}$$

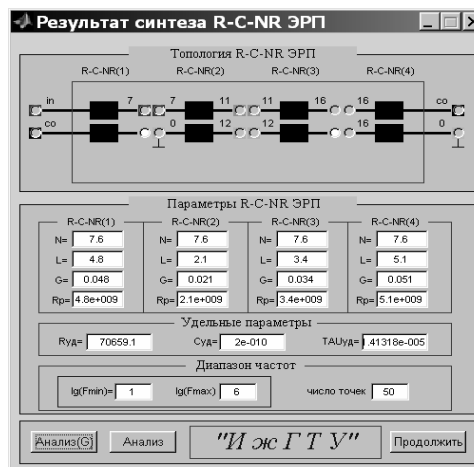
выбирают два разных решения:

$$w_k^t, w_{k+1}^t \in W^t (w_k^t \neq w_{k+1}^t),$$

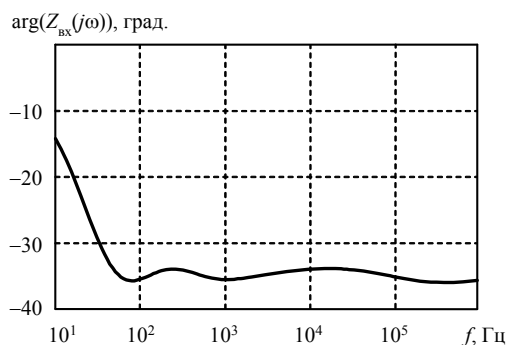
здесь  $w_i^t$  –  $i$ -е решение;  $W^t$  – множество полученных решений в области представлений после  $t$  итераций генетического алгоритма.

Для исключения неудачных решений используется селекционная схема, при которой новая популяция формируется из предыдущей путем ограничения количества упорядоченных по убыванию функции фитнеса особей.

На рис. 7 представлены результаты работы программы синтеза, реализующей рассмотренный алгоритм.



а



б

Рис. 7. Пример работы программы синтеза  $R - C - NR$  ЭПП: а – диалоговое окно с результатом синтеза; б – синтезированная ФЧХ

На рис. 7, а показано диалоговое окно, в котором выведены схемы соединений и включения фрактального элемента (множество С), а также элементы множества Р. Здесь узлы, имеющие одинаковые номера, объединены, а узлы без номеров – не задействованы. На рис. 7, б изображена фазочастотная характеристика входного импеданса синтезированного элемента, соответствующая следующим требованиям: уровень постоянства фазы  $-35 \pm 1^\circ$  в диапазоне частот от  $10^2$  до  $10^6$  Гц.

**Библиографические ссылки**

1. Потапов А. А., Гильмутдинов А. Х., Ушаков П. А. Фрактальные радиоэлементы и радиосистемы : Физический аспект : монография / под ред. А. А. Потапова. – М. : Радиотехника, 2009. – 200 с.
2. Ушаков П. А. Методы анализа и синтеза многослойных неоднородных RC-элементов с распределенными параметрами и устройств на их основе : дис. ... д-ра техн. наук. – Казань, 2009. – 379 с.

*P. A. Ushakov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*K. O. Maksimov*, Applicant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### **Development of Genetic Algorithm of Fractal Element Layout Synthesis Based on Resistance-Capacitance Medium with R-C-NR Structure of Layers**

*The paper considers the problems of coding the information on design, technology and circuitry parameters of a fractal element on the multilayered film basis of the resistor-capacitor medium, providing the performance of genetic operations of a genetic algorithm (GA). The synthesis algorithm of fractal elements layouts based on GA is developed and synthesis results are shown for the synthesis program developed by authors.*

**Key words:** RC-element with distributed parameters, fractal element, genetic algorithm.

УДК 681.518.3+623.546

**А. Ю. Вдовин**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. С. Казаков**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. В. Коробейников**, кандидат технических наук, доцент, Институт механики УрО РАН, Ижевск

**В. А. Киселев**, магистрант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MICRO-CAP ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВЫХ ЭКРАНОВ**

*Приведены результаты моделирования в среде Micro-Cap оптического датчика, применяемого в системах определения внешнебаллистических параметров, и результаты исследования адекватности предложенной модели.*

**Ключевые слова:** модель, датчик, световой экран, внешняя баллистика.

**В** настоящее время в информационно-измерительных системах для определения внешнебаллистических параметров пуль и снарядов применяются различные типы блокирующих устройств (акустические, соленоидные, оптико-электронные) [2–5]. Наиболее универсальными при этом являются системы на основе световых экранов, каждый из которых образован линейным излучателем и оптическим датчиком (фотоприемником). При пересечении пуль светового экрана часть светового потока от излучателя к фотоприемнику затеняется, в результате чего на выходе датчика формируется электрический импульс (сигнал).

В ряде случаев сигнал с оптического датчика сильно зашумлен, что обусловлено флюктуационными помехами и низкочастотными помехами, возникающими в связи с запитыванием излучателей от источника переменного напряжения. Поэтому в таких системах решающее значение приобретают алгоритмы цифровой обработки сигналов (в частности, применяется селекция по амплитуде и временная селекция длительности импульса для отсеечения ложных срабатываний). Параметры регистрируемого импульса зависят от геометрических размеров и скорости пули, а также других факторов и могут существенно отличаться при стрельбе из различных типов оружия. Поэтому для каждого конкретного типа пули желательно применять индивидуальный алгоритм обработки сигнала [3]. Номенклатура испытываемых

образцов стрелкового оружия (и, соответственно, патронов к ним) постоянно расширяется, причем стоимость выстрела (особенно для современных изделий) достаточно высока. В связи с этим для снижения стоимости проведения предварительных испытаний стрелкового оружия целесообразна разработка модели оптического датчика, на входе которой задается кривая изменения площади тени при пересечении пуль светового экрана, а на выходе снимается искомым импульс. На рис. 1 показана схема оптического датчика в среде Micro-Cap [6], при этом фотодиод заменен эквивалентной схемой из элементов V4, R11, П1 и D5.

На схеме V4 – источник напряжения, позволяющий задавать входные воздействия произвольной формы [7].

Для моделирования процесса пересечения светового экрана пуль сферической формы и получения кривой изменения площади тени в среде Lazarus была разработана программа, интерфейс которой показан на рис. 2.

Программа позволяет задавать диаметр пули и толщину светового экрана в пикселях (10 пикселей соответствуют 1 мм), тангенс угла наклона светового экрана в направлении стрельбы и скорость пули. Площадь тени  $S_T$  вычисляется путем статистического моделирования по методу Монте – Карло [6], при этом принято, что весовая функция светового экрана [1] равна константе, скорость пули при пересече-