

# Анализ и параметрическая оптимизация эволюционными методами витка меандровой микрополосковой линии с учетом температуры

К.П. Малыгин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск,  
malyginkp@gmail.com

**Аннотация** — Представлены результаты анализа и оптимизации эволюционными методами витка меандровой микрополосковой линии с учетом влияния температуры окружающей среды в диапазоне от минус 50 до 150 °С. Использована простая температурная модель линейного изменения параметров витка. В результате анализа выявлено, что изменение температуры во всем диапазоне приводит к уменьшению погонных задержек четной и нечетной мод витка до 3,23 и 2,42% соответственно и уменьшению максимальной амплитуды импульсного сигнала на выходе линии до 0,17%, но увеличению среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии до 3%. Продемонстрирована возможность параметрической одно- и двухкритериальной оптимизации поперечного сечения витка с учетом влияния температуры с помощью двух методов оптимизации: генетических алгоритмов и эволюционных стратегий. Выявлено хорошее согласование результатов оптимизации двумя методами, но при близких наборах оптимальных параметров время оптимизация эволюционными стратегиями оказалось в 7 раз меньше.

**Ключевые слова** — виток меандровой линии, температурная модель, параметрическая оптимизация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) давно активно применяется во многих отраслях, в том числе военной и воздушно-космической. Такая аппаратура функционирует в особо сложных, а зачастую жестких климатических условиях, которые могут оказывать на нее негативное влияние, ухудшая заданные характеристики. На околоземной орбите металл под прямыми лучами солнца прогревается до 160 °С, а в тени остывает до минус 100 °С. Изменение температуры среды может приводить к изменению химикофизических и механических свойств материалов [1]. При повышении температуры ускоряется развитие дефектов материалов, что ведет к понижению прочности соединений и элементов конструкций. Кроме того, при одновременном воздействии температуры и механических нагрузок большинство материалов подвержено деформации. У ряда материалов нагревание вызывает химическое разложение и ускоренное старение. Поэтому в зависимости от области эксплуатации РЭА, в числе прочих, проводятся и климатические испытания, на этапе которых определяются материалы, удовлетворяющие заданным требо-

ваниям [2]. Между тем натурные испытания и изменения в случае их отрицательных результатов могут оказаться весьма затратными, поэтому учет влияния климатических факторов на раннем этапе проектирования позволит минимизировать эти затраты. Для этого целесообразно предварительное компьютерное моделирование с оптимизацией.

Одним из важных аспектов при проектировании РЭА является обеспечение ее бесперебойной работы при электромагнитных воздействиях (ЭМВ), что особенно актуально для РЭА воздушно-космической отрасли в связи со сложной электромагнитной обстановкой орбиты. Постоянное совершенствование РЭА (уменьшение рабочих напряжений и увеличение граничных частот спектра используемых сигналов) ведет к повышению чувствительности ее элементов к ЭМВ, которые могут быть как природными (электростатический разряд, вторичные проявления разряда молнии), так и преднамеренными (ПД ЭМВ) [3]. Особую опасность для РЭА представляют импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов [4]. Наиболее известными средствами защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) являются ограничители помех, электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки и газоразрядники. Также известно применение устройств на основе печатных структур для защиты и фильтрации сигнала в полосе частот [5–10]. Традиционные решения имеют ряд недостатков, затрудняющих их использование в критичной РЭА. Среди них можно выделить малые мощность и быстродействие [11], наличие паразитных эффектов [12], потери свойств изолирующего диэлектрика между обкладками конденсаторов [13].

Примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в печатных структурах – меандровых линиях [14]–[16]. Его достоинством является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии. Подход основан на разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет оптимизации параметров поперечного сечения структуры. Еще одним близким к этому подходу является разложение СКИ в связанных линиях (модальных фильтрах) [17–18]. Однако в самом простом случае,

при одинаковых длинах и параметрах поперечного сечения, виток меандровой линии позволяет обеспечить большее ослабление за счет разложения СКИ на большее количество импульсов, причем СКИ удвоенной длительности. Применение таких устройств защиты на практике в сложных климатических условиях требует предварительного детального моделирования в диапазоне температур и оптимизации их параметров с учетом её влияния. Оптимизация эвристическим поиском потребует значительных временных затрат и может не привести к приемлемому результату. Поэтому видится необходимым применение методов глобальной оптимизации, например, генетических алгоритмов (ГА) и эволюционных стратегий (ЭС), поскольку они довольно просты в использовании и реализованы в собственном программном продукте [19]. Таким образом, целесообразно представить результаты анализа влияния температуры на характеристики простой структуры (например, витка меандровой микрополосковой линии (МПЛ) из [15]) и продемонстрировать возможность оптимизации ее параметров с учетом влияния температуры. Цель работы – выполнить такое исследование.

## II. ТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования принята температурная модель, апробированная ранее [20]. Сначала рассмотрим модель для учета влияния температуры на геометрические параметры. Она имеет общий вид  $P(T)$ , где  $P$  – какая-либо из характеристик структуры,  $T$  – текущая температура окружающей среды. Выполнена программная реализация модели термического расширения геометрических параметров линии по выражению

$$x = x_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (1)$$

где  $x$  – значение параметра линии с учетом термического расширения;  $x_0$  – исходное значение этого параметра;  $\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения материала;  $\Delta T$  – разница температур. Значение  $\alpha$  для меди принято равным  $17 \cdot 10^{-6}$  в соответствии с [21], а для диэлектрической подложки (материал FR-4) по оси  $Z$  –  $70 \cdot 10^{-6}$ , а по осям  $X$  и  $Y$  –  $17 \cdot 10^{-6}$  [22].

Температурная зависимость электрофизических параметров может быть учтена аналогичным образом. Для относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r$ ) FR-4 коэффициент  $\alpha$  получен на основе данных из работы [23]

$$\alpha = \frac{\epsilon_{r \max} - \epsilon_{r \min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (2)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – максимальное и минимальное из значений диапазона температур, а  $\epsilon_{r \max}$  и  $\epsilon_{r \min}$  – максимальное и минимальное из значений  $\epsilon_r$  для крайних точек диапазона  $T$ .

## III. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Поперечное сечение витка меандровой МПЛ представлено на рисунке 1а, ( $d$  – расстояние от края структуры до проводника ( $3w$ ),  $w$  – ширина проводников (300 мкм),  $s$  – расстояние между проводниками

(27 мкм),  $t$  – толщина проводников (105 мкм),  $h$  – расстояние между опорным и сигнальными проводниками (510 мкм),  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки (4,4), а его схема соединений – на рисунке 1б (воздействие – трапецевидный СКИ с амплитудой э.д.с. 1 В и длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс; длина полувитка  $l=30$  мм). Приведенные выше геометрические параметры МПЛ далее будем называть исходными.

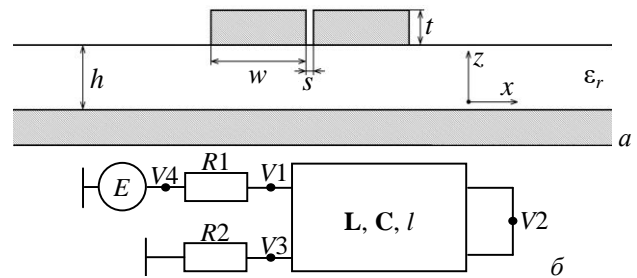


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) витка меандровой МПЛ

## IV. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИТКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вычислены и сведены в таблицу 1 зависимости погонных задержек четной ( $\tau_e$ ) и нечетной ( $\tau_o$ ) мод, среднего геометрического их волновых сопротивлений ( $Z_{cp}$ ) и амплитуды напряжения на выходе ( $U_{\max}$ ) витка с исходными параметрами от  $T$ .

Таблица 1

Зависимости $\tau_e$ , $\tau_o$ , $Z_{cp}$ и $U_{\max}$ от $T$				
$T$ , °C	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{\max}$ , В
-50	4,49209	5,99301	48,2497	0,207676
-25	4,47107	5,9502	48,5532	0,207614
0	4,44995	5,90709	48,8622	0,207459
25	4,42874	5,86367	49,1768	0,207536
50	4,40743	5,81993	49,4971	0,207875
75	4,38602	5,77587	49,8235	0,208222
100	4,36451	5,73147	50,1561	0,208574
125	4,34289	5,68674	50,4951	0,208935
150	4,32117	5,64165	50,8408	0,209303

Из таблицы 1 видно, что с ростом  $T$  значения  $\tau_e$  и  $\tau_o$  уменьшаются, а  $Z_{cp}$  и  $U_{\max}$  – увеличиваются. Максимальные изменения значений  $\tau_e$  и  $\tau_o$  составили 3,02% и 1,94% соответственно,  $Z_{cp}$  – 2,61%,  $U_{\max}$  – 0,44%. На рисунке 2 показаны вычисленные в системе TALGAT отклики на заданное воздействие на выходе витка при  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$ .

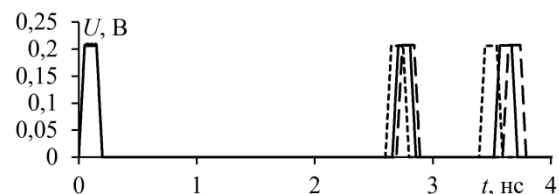


Рис. 2. Временные отклики на выходе витка при  $T = -50$  (---),  $25$  (—) и  $150^\circ\text{C}$  (- -)

Таблица 7

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $h=400$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,50595	6,05162	44,9206	0,21297
25	4,44188	5,91995	45,7948	0,2124
150	4,7692	5,66926	67,5837	0,232058

Таблица 8

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $\epsilon_r=6$ 

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,91818	6,83633	43,1745	0,20954
25	4,86028	6,72312	43,8398	0,20909
150	4,76226	6,53026	45,0137	0,20872

Таблица 9

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $\epsilon_r=10$ 

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	5,84983	8,58697	35,3224	0,21183
25	5,80104	8,4966	35,6951	0,21165
150	5,71886	8,34399	36,3391	0,21136

Таблица 10

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $\epsilon_r=14$ 

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	6,65256	10,0356	30,639	0,21294
25	6,60957	9,95786	30,8898	0,2128
150	6,53733	9,82709	31,3187	0,21256

Из рисунка 2 видно, что  $U_{max}$  при крайних значениях  $T$  отличаются слабо (0,207676 В при  $T=-50^\circ\text{C}$  и 0,209303 В при  $T=150^\circ\text{C}$ ). Также видно, что время прихода второго и третьего импульсов значительно меняется в зависимости от  $T$ . Это связано с влиянием  $T$  на  $\tau_e$  и  $\tau_o$ . При этом увеличение  $T$  оказывает более значительное влияние на  $\tau_e$  (максимальное отклонение 3,02%), чем на  $\tau_o$  (максимальное отклонение 1,94%).

Выполнен анализ влияния изменения геометрических параметров на значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  с учетом температурной модели во всем диапазоне рассматриваемых температур, но для экономии места результаты приведены только при  $T=-50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$ . Полученные результаты при изменении параметров витка ( $s$ ,  $h$  и  $\epsilon_r$ ) в соответствии с температурной моделью сведены в таблицы 2–10 (в качестве примера представлены результаты для произвольно выбранных значений  $s$ ,  $h$  и  $\epsilon_r$ ). Отметим, что при изменении какого-либо параметра структуры остальные её параметры фиксированы и приняты исходными. Также отметим, что при изменении  $\epsilon_r$  коэффициент  $\alpha$  соответствует материалу FR-4 и вычислялся по выражению (2).

Таблица 2

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $s=40$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,66341	6,00015	53,1365	0,216569
25	4,5918	5,87047	54,1938	0,216188
150	4,46999	5,64786	56,0954	0,215634

Таблица 3

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $s=70$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,8841	6,0137	59,8252	0,227043
25	4,8022	5,8834	61,0637	0,226752
150	4,6625	5,65971	63,2966	0,226339

Таблица 4

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $s=100$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	5,0061	6,02454	63,8033	0,23247
25	4,9186	5,89376	65,1509	0,232321
150	4,7692	5,66926	67,5837	0,232058

Таблица 5

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $h=100$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,81949	6,46201	25,4518	0,23854
25	4,73944	6,31319	26,0137	0,23838
150	4,60346	6,05732	27,0275	0,23772

Таблица 6

Значения  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при  $h=250$  мкм

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_o$ , нс/м	$\tau_e$ , нс/м	$Z_{cp}$ , Ом	$U_{max}$ , В
-50	4,5562	6,17901	38,302	0,22292
25	4,48949	6,04208	39,0719	0,22255
150	4,37625	5,80689	40,4557	0,22191

Из таблиц 2–10 видно, что с ростом  $T$  во всем диапазоне изменяемых параметров меандровой МПЛ значения  $\tau_o$  и  $\tau_e$  уменьшаются,  $Z_{cp}$  увеличивается, а  $U_{max}$  уменьшается незначительно. Максимальные изменения значений  $\tau_o$ ,  $\tau_e$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  при изменении  $T$  отличаются для каждого значения из набора изменяемых параметров. Для наглядной демонстрации этого в таблицы 11–13 сведены зависимости максимальных изменений характеристик витка во всем диапазоне  $T$  от изменения ее параметров. Из них видно, что увеличение значения  $s$  приводит к увеличению влияния  $T$  на  $\tau_o$ ,  $\tau_e$  и  $Z_{cp}$ , и к уменьшению влияния  $T$  на  $U_{max}$ . Увеличение значений отдельно, как  $h$ , так и  $\epsilon_r$ , приводит к уменьшению влияния  $T$  на  $\tau_o$ ,  $\tau_e$  и  $Z_{cp}$ . Однако при увеличении  $h$  влияние  $T$  на  $U_{max}$  увеличивается, а при уменьшении  $\epsilon_r$  – уменьшается. При этом изменение каждого параметра из-за изменения  $T$  в разной степени влияет на характеристики витка. Так, влияние  $T$  на  $\tau_o$  увеличивается на 0,3% при увеличении  $s$  и уменьшается на 0,33% и 0,74% при увеличении  $h$  и  $\epsilon_r$  соответственно, на  $\tau_e$  – увеличивается на 0,02% при увеличении  $s$  и уменьшается на 0,18% и 1,24% при увеличении  $h$  и  $\epsilon_r$  соответственно, на  $Z_{cp}$  – увеличивается на 0,17% при увеличении  $s$  и уменьшается на 0,35% и 0,99% при увеличении  $h$  и  $\epsilon_r$  соответственно, на  $U_{max}$  – уменьшается на 0,11% при увеличении  $s$  и увеличивается на 0,09% и уменьшается на 0,11% при увеличении  $h$  и  $\epsilon_r$  соответственно. Отметим, что при изменении геометрических параметров в более широком диапазоне уменьшение влияния  $T$  на характеристики витка может

быть более значимым. Это позволит найти точку минимальной чувствительности, когда изменение  $T$  будет оказывать наименьшее влияние на характеристики меандровой МПЛ или не будет оказывать его вовсе. Также видно, что с увеличением значений  $s$  и  $\varepsilon_r$  увеличиваются задержки второго и третьего импульсов, а увеличение значения  $h$ , наоборот, приводит к их уменьшению.

Таблица 11

Зависимости максимальных изменений (%) значений  $\tau_o$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  во всем диапазоне  $T$  от изменения  $s$

Характеристика	40 мкм	70 мкм	100 мкм
$\tau_o$	2,12	2,32	2,42
$\tau_e$	3,02	3,03	3,04
$Z_{cp}$	2,71	2,82	2,88
$U_{max}$	0,22	0,16	0,11

Таблица 12

Зависимости максимальных изменений (%) значений  $\tau_o$ ,  $\tau_e$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  во всем диапазоне  $T$  от изменения  $h$

Характеристика	100 мкм	250 мкм	400 мкм
$\tau_o$	2,29	2,01	1,96
$\tau_e$	3,23	3,10	3,05
$Z_{cp}$	3	2,73	2,65
$U_{max}$	0,17	0,23	0,26

Таблица 13

Зависимости максимальных изменений (%) значений  $\tau_o$ ,  $\tau_e$ ,  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  во всем диапазоне  $T$  от изменения  $\varepsilon_r$

Характеристика	6	10	14
$\tau_o$	1,61	1,13	0,87
$\tau_e$	2,29	1,44	1,05
$Z_{cp}$	2,09	1,42	1,10
$U_{max}$	0,20	0,11	0,09

## V. ОПТИМИЗАЦИЯ МЕАНДРОВОЙ МПЛ С ПОМОЩЬЮ ГА И ЭС С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ

Выполнена оптимизация витка меандровой МПЛ с помощью ГА с учетом температурной модели. В процессе оптимизации изменяемыми параметрами выбраны  $w$  и  $\varepsilon_r$  в диапазонах  $50 \text{ мкм} \leq w \leq 500 \text{ мкм}$  и  $1 \leq \varepsilon_r \leq 10$ . Оставшиеся геометрические параметры приняты исходными. При формулировке многокритериальной целевой функции необходимо привести отдельные критерии к задаче минимизации или максимизации. Будем рассматривать минимизацию суммы

$$F = \sum_i F_i, \quad (1)$$

где

$$F_i = M_i \frac{f_i}{K_i}, \quad (2)$$

где для  $i$ -го критерия:  $f_i$  – целевая функция;  $K_i$  – нормировочный коэффициент;  $M_i$  – весовой коэффициент;  $i = 1, 2, \dots, N_C$ , где  $N_C$  – число критериев оптимизации. Коэффициент  $K_i$  выбирают равным максимальному из возможных значений  $i$ -й целевой функции так, чтобы

величина  $f_i/K_i$  стала безразмерной и принимала значения от 0 до 1. Коэффициент  $M_i$  задает значимость  $i$ -го критерия. Если критерии равнозначны, то коэффициенты одинаковы и могут задаваться как 1 или как

$$M_i = \frac{1}{N_C}. \quad (3)$$

Первым критерием при оптимизации витка с помощью ГА является критерий согласования. Этот критерий необходим для минимизации отражений на концах витка. Так, известно условие согласования пары связанных линий с окончаниями  $R$ . Оно определяется как среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии [24]

$$R = Z_{cp} = \sqrt{Z_e Z_o}. \quad (4)$$

Так как приведение всех критериев целевой функции сводится к задаче минимизации, то выражения для  $f_i$  и  $K_i$  сформулированы как

$$f_1 = 50 - Z_{cp}, \quad K_1 = Z_{max}, \quad (5)$$

где  $Z_{max}$  – максимально возможное значение среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод витка. Это значение найдено в результате многовариантного вычисления  $Z_{max}$  для крайних значений изменяемых параметров  $w$  и  $\varepsilon_r$  и составило 98,4732 Ом при минус 50°C, 102,011 Ом при 25°C и 108,968 Ом при 150°C.

Вторым важным критерием для оптимизации является минимизация амплитуды. Для защиты от СКИ актуален анализ формы сигнала  $U(t)$  на выходе витка. Поскольку опасность представляет максимальный уровень сигнала  $U(t)$  на выходе витка, то выражения для  $f_i$  и  $K_i$  можно сформулировать как

$$f_2 = \max|U(t)|, \quad K_2 = \max|E(t)|, \quad (6)$$

где  $E(t)$  – э.д.с. источника.

Тогда задача многокритериальной оптимизации записывается в виде целевой функции

$$F = M_1 \frac{f_1}{K_1} + M_2 \frac{f_2}{K_2},$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – нормировочные коэффициенты, которые равны максимальным значениям  $f_1$  и  $f_2$  соответственно. Весовые коэффициенты ( $M_1$  и  $M_2$ ) каждого критерия приняты равными по 0,5. Для кодирования каждого параметра использовалось 10 бит. Количества особей и поколений ГА приняты по 10 и 20 соответственно, так что 200 вычислений для рассматриваемой структуры с учетом двух изменяемых параметров и их диапазона даст возможность получить искомым набор параметров и хорошую сходимость значений требуемых характеристик (максимальное отклонение полученных значений  $Z_{cp}$  и  $U_{max}$  не более 0,39% и 0,84% соответственно). Среднее время одного запуска составило около 230 с. Сначала выполнена оптимизация только по критерию согласования. Результаты оптимизации для

крайних значений температур минус 50, 25 и 150°C представлены в таблицах 14–16.

Таблица 17

Таблица 14

Результаты работы ГА при  $T = -50^\circ\text{C}$  по критерию (5)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	321,765	3,71765	50,032	0,20773
2	72,9412	9,61176	50,0104	0,22891
3	189,412	5,65882	49,9131	0,21689
4	247,647	4,63529	49,9912	0,21202
5	487,647	2,44706	50,0068	0,21144
Максимальное отклонение			0,12%	4,85%

Таблица 15

Результаты работы ГА при  $T = 25^\circ\text{C}$  по критерию (5)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	85,2941	9,22353	49,8809	0,22757
2	492,941	2,65882	49,97	0,21288
3	87,0588	9,08235	49,9925	0,22743
4	131,176	7,31765	50,0508	0,22274
5	275,882	4,52941	49,8377	0,20987
Максимальное отклонение			0,21%	4,05%

Таблица 16

Результаты работы ГА при  $T = 150^\circ\text{C}$  по критерию (5)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	117,059	8,2	50,0328	0,22442
2	367,647	3,92941	49,9755	0,21012
3	192,941	6,25882	49,8141	0,21688
4	323,529	4,35294	49,9473	0,20894
5	318,235	4,38824	50,0342	0,20883
Максимальное отклонение			0,22%	3,6%

Из таблиц 14–16 видно, что максимальное отклонение значений  $Z_{\text{ср}}$  не превышает 0,22%. При этом отклонение от эталонного значения  $Z_{\text{ср}} = 50$  Ом худшего полученного с помощью ГА значения составляет лишь 0,09, 0,16 и 0,19% при  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$  соответственно. Полученные минимальное и максимальное значения  $Z_{\text{ср}}$  во всем диапазоне  $T$  составили 49,8141 и 50,0508 Ом соответственно. Минимальное и максимальное значения  $U_{\text{max}}$  во всем диапазоне  $T$  составили 0,20773 и 0,22891 В соответственно. При этом полученные значения параметров  $w$  и  $\varepsilon_r$  на каждом запуске отличаются. Это объясняется существованием большого числа локальных минимумов целевой функции.

Затем выполнена оптимизация только по критерию минимизации амплитуды на выходе меандровой МПЛ. Ее результаты для значений  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$  сведены в таблицы 17–19.

Результаты работы ГА при  $T = -50^\circ\text{C}$  по критерию (6)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	219,412	8,23529	41,7242	0,208432
2	355,294	2,8	53,1236	0,208099
3	252,941	5,94118	45,4851	0,208088
4	429,412	1,95294	55,5422	0,208379
5	242,353	6,96471	43,3543	0,207907
Максимальное отклонение			14,21%	0,13%

Таблица 18

Результаты работы ГА при  $T = 25^\circ\text{C}$  по критерию (6)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	302,353	4,10588	50,283	0,208368
2	249,412	7,35294	42,6795	0,208469
3	455,882	2,05882	55,486	0,208376
4	290	4,67059	48,6024	0,207749
5	219,412	8,55294	41,5827	0,208411
Максимальное отклонение			14,32%	0,17%

Таблица 19

Результаты работы ГА при  $T = 150^\circ\text{C}$  по критерию (6)

№ запуска	$w$ , МКМ	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	230	9,4	40,2411	0,207968
2	231,765	8,02353	42,9365	0,208427
3	263,529	6,61176	44,9031	0,20794
4	222,941	9,47059	40,449	0,208077
5	325,294	3,96471	51,6645	0,208403
Максимальное отклонение			12,43%	0,12%

Из таблиц 17–19 видно, что максимальное отклонение значений  $U_{\text{max}}$  не превышает 0,17%. Полученное максимальное значение  $U_{\text{max}}$  для минус 50°C составило 0,208432 В, для 25°C – 0,208469 В, а для 150°C – 0,208427 В. Полученные минимальное и максимальное значения  $U_{\text{max}}$  во всем диапазоне температур составили 0,207749 и 0,208469 В соответственно. Что касается полученных значений  $Z_{\text{ср}}$ , то их минимальное и максимальное значения во всем диапазоне  $T$  составили 40,2411 и 55,5422 Ом соответственно. При этом полученные значения параметров  $w$  и  $\varepsilon_r$  на большинстве запусков также отличаются из-за большого количества локальных минимумов целевой функции.

Наконец, выполнена многокритериальная оптимизация, одновременно по критериям согласования и минимизации амплитуды в конце витка меандровой МПЛ. Ее результаты для крайних значений температур минус 50, 25 и 150°C сведены в таблицы 20, 21. Видно, что максимальные отклонения значений  $Z_{\text{ср}}$  и  $U_{\text{max}}$  находятся в пределах 0,83% и 1,31% соответственно. Полученные минимальное и максимальное значения  $U_{\text{max}}$  во всем диапазоне  $T$  составили 0,2082 и 0,21442 В соответственно, а минимальное и максимальное значения  $Z_{\text{ср}}$  – 48,9312 и 50,3438 Ом соответственно. При этом полученные значения параметров  $w$  и  $\varepsilon_r$  на большинстве запусков отличаются, так как существует множество локальных минимумов целевой функции.

Таблица 20

Результаты работы ГА при  $T = -50^\circ\text{C}$   
по критериям (5) и (6)

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	208,824	5,58824	48,9312	0,214421
2	272,353	4,49412	49,2304	0,209459
3	281,176	4,35294	49,3304	0,208883
4	448,824	2,72941	49,7501	0,212265
5	215,882	5,44706	48,9652	0,21383
Максимальное отклонение			0,83%	1,31%

Таблица 21

Результаты работы ГА при  $T = 25^\circ\text{C}$   
по критериям (5) и (6)

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	302,353	4,17647	49,9824	0,208204
2	369,412	3,47059	50,2108	0,210241
3	390,588	3,36471	49,871	0,210852
4	432,941	3,01176	50,0829	0,211697
5	291,765	4,21176	50,3438	0,209168
Максимальное отклонение			0,47%	0,83%

Таблица 22

Результаты работы ГА при  $T = 150^\circ\text{C}$   
по критериям (5) и (6)

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$Z_{\text{ср}}$ , Ом	$U_{\text{max}}$ , В
1	304,118	4,52941	50,0842	0,208385
2	298,824	4,6	50,0385	0,208646
3	293,529	4,70588	49,8549	0,208855
4	325,294	4,31765	50,0228	0,208209
5	462,941	3,25882	49,806	0,211587
Максимальное отклонение			0,28%	0,80%

Для возможности сравнения выполнена оптимизация с помощью ЭС по критерию минимизации амплитуды в конце линии. Геометрические параметры и диапазоны искомого параметров выбраны такими же, как при оптимизации с помощью ГА. Количество вычислений принято равным 70. Такое количество вычислений для рассматриваемой структуры с учетом изменяемых параметров и их диапазона даёт возможность получить искомым набор параметров и хорошую сходимость (максимальное отклонение полученных значений  $U_{\text{max}}$  не более 0,36%). Среднее время одного запуска составило около 33 с. Результаты оптимизации для  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$  сведены в таблицы 23–25.

Таблица 23

Результаты работы ЭС при  $T = -50^\circ\text{C}$

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$U_{\text{max}}$ , В
1	243,74	6,13	0,2086
2	336,72	3,19	0,2083
3	357,76	2,72	0,2081
4	249,82	5,85	0,2084
5	229,87	7,85	0,2088
Максимальное отклонение			0,17%

Таблица 24

Результаты работы ЭС при  $T = 25^\circ\text{C}$

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$U_{\text{max}}$ , В
1	246,85	6,80	0,2087
2	240,57	7,49	0,2085
3	250,35	6,11	0,2085
4	271,77	5,43	0,2075
5	297,92	4,22	0,2084
Максимальное отклонение			0,30%

Таблица 25

Результаты работы ЭС при  $T = 150^\circ\text{C}$

№ запуска	$w$ , мкм	$\varepsilon_r$	$U_{\text{max}}$ , В
1	310,12	4,91	0,2094
2	252,61	7,24	0,2079
3	374,33	3,40	0,2091
4	370,83	3,09	0,2085
5	465,66	2,13	0,2085
Максимальное отклонение			0,36%

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выявлены закономерности изменения характеристик витка меандровой МПЛ при влиянии на нее температуры в диапазоне от минус 50 до  $150^\circ\text{C}$ , а также продемонстрирована возможность использования ГА или ЭС совместно с температурной моделью для параметрической оптимизации витка меандровой МПЛ с учетом влияния температуры. В ходе анализа влияния температуры выявлено: незначительное влияние изменения температуры  $T$  в диапазоне от минус 50 до  $150^\circ\text{C}$  на характеристики витка; характер влияния температуры отдельно на каждую характеристику витка; максимальные отклонения характеристик витка при изменении температуры во всем диапазоне изменяемых геометрических параметров – 3,23% и 2,42% для погонных задержек четной и нечетной мод соответственно, 0,26% для максимальной амплитуды в конце витка и 3% для среднего геометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод линии. Показана возможность использования температурной модели совместно с ГА или ЭС для нахождения такого набора оптимальных геометрических и электрических параметров поперечного сечения, при котором отклонение полученных характеристик от эталонных при изменении температуры в диапазоне от минус 50 до  $150^\circ\text{C}$  будет минимальным, что важно для практики. Выявлено, что за счет выбора параметров линии возможно уменьшение влияния  $T$  на ее характеристики. В результате оптимизации витка с помощью ГА с использованием температурной модели найдены наборы оптимальных геометрических параметров витка, обеспечивающие равенство среднего геометрического значения волновых сопротивлений его четной и нечетной мод сопротивлению 50 Ом и минимальную амплитуду на ее выходе при  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$ . Максимальное отклонение характеристик в результате работы ГА по двум критериям в результате 5 запусков составило 0,83% для среднего геометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод

витка и 1,31% для максимальной амплитуды на выходе линии. В результате оптимизации витка с помощью ЭС с использованием температурной модели найдены оптимальные геометрические параметры линии, обеспечивающие минимальную амплитуду на ее выходе при  $T = -50, 25$  и  $150^\circ\text{C}$ . Максимальное отклонение значения максимальной амплитуды на выходе витка в результате 5 запусков ЭС составило 0,36%. Выявлено хорошее согласование результатов оптимизации двумя методами, но при близких наборах оптимальных параметров время оптимизация эволюционными стратегиями оказалось в 7 раз меньше.

#### ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2022-0001 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клюев В.В. Испытательная техника: Справочник. М.: Машиностроение, Книга 1, 1982, 528 с.
- [2] ГОСТ Р 51369-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности.
- [3] Газизов Т.Р. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий. М.: Томский государственный университет, 2002. 206 с.
- [4] Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев, В.А. Туркин, А.Н. Корнев, С.Н. Долбня, А.В. Певнев // Технологии ЭМС. 2006. №3 (18). С. 36–45.
- [5] Krzikalla R., et al. "Systematic description of the protection capability of protection elements," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1–4.
- [6] Krzikalla R., et al. "Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Istanbul, Turkey, 2003, pp. 1313–1316.
- [7] Krzikalla R. and J.L. ter Haseborg, "SPICE simulations of UWB pulse stressed protection elements against transient interferences," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Chicago, IL, USA, pp. 977–981, 2005.
- [8] Weber T., et al., "Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses," IEEE Trans. on EMC, vol. 36, no. 3, 2004, pp. 423–430.
- [9] Cui Q., et al., "Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection," in IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), 2012, Bangkok, Thailand, Dec. 2012, pp. 3–5.
- [10] Hayashi H., et al., "ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance," in International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2005 (SISPAD 2005), Tokyo, Japan, Sept. 2005, pp. 99–102.
- [11] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. "Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference," Journal of Communications Technology and Electronics, no. 5, 2016, pp. 546–550
- [12] Зайкова С.А. Пассивные компоненты радиоэлектронной аппаратуры. Пособие. Гродно. ГрГУ. 2009. 67 с
- [13] Колдунов А.С. Радиолобительская азбука. Аналоговые устройства. М: СОЛОН–Пресс. том. 2. 2009. 288 с.
- [14] Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russian Federation. May 2015. 5 p.
- [15] Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // X International IEEE Scientific and Technical Conference. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. P. 151–154.
- [16] Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Носов А.В. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиозлектроники. 2016. № 3 (19). С. 47–50.
- [17] Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М., Лакоза А.М. Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. № 4. С. 127–133.
- [18] Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. Дополнительные импульсы при разложении сверхкороткого импульса в модальном фильтре с лицевой и торцевой связями на двухсторонней печатной плате // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. № 4. С. 134–139.
- [19] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. vol. 560. pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012110.
- [20] Sagieva I.Y., Noso A.V., Surovtsev R.S. The Influence of temperature on microstrip transmission line characteristics // XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Altai, Russia, 29 June - 3 July 2020. P. 191–194.
- [21] Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Механика. Теплота. Молекулярная физика. Т. 1. М.: Наука. 1985. 606 с.
- [22] Nowotnick M. Высокотемпературные электронные модули на основе органических плат [High-temperature electronic modules based on organic boards]. Технологии в электронной промышленности. 2009. Ч. 8. С. 51–55.
- [23] Li H-M., Ra C-H., et al. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications // Journal of the Korean Physical Society. no. 3. March 2009. pp. 1096–1099.
- [24] Belousov A.O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. Vol. 2018. P. 1–15.

# Analysis and Parametric Optimization by Evolutionary Methods of a Turn of a Meander Microstrip Line, Taking into Account Temperature

K.P. Malygin, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk

**Abstract** — The results of analysis and optimization by evolutionary methods of a turn of a meander microstrip line are presented, taking into account the influence of ambient temperature in the range from minus 50 to 150 °C. A simple temperature model of a linear change in the turn parameters is used. As a result of the analysis, it was revealed that a change in temperature over the entire range leads to a decrease in the linear delays of the even and odd coil modes to 3.23 and 2.42%, respectively, and a decrease in the maximum amplitude of the pulse signal at the line output to 0.17%, but an increase the geometric mean impedance of the even and odd line modes up to 3%. The possibility of parametric one- and two-criteria optimization of the coil cross-section, taking into account the influence of temperature, is demonstrated using two optimization methods: genetic algorithms and evolutionary strategies. A good agreement between the optimization results by two methods was revealed, but with close sets of optimal parameters, the time of optimization by evolutionary strategies turned out to be 7 times less.

**Keywords** — meander line turn, temperature model, parametric optimization.

## REFERENCES

- [1] Klyuev V.V. *Ispy`tatel`naya texnika: Spravochnik (Test Equipment: Handbook)*. M.: Mashinostroenie, Kniga 1, 1982, 528 s.
- [2] GOST R 51369-99. *Metody` ispy`taniy na stojkost` k klimatcheskim vneshnim vozdeystvuyushhim faktoram mashin, priborov i drugix texnicheskix izdelij. Ispy`taniya na vozdeystvie vlazhnosti (Test methods for resistance to climatic external influences of machines, devices and other technical products. Tests on the effects of humidity)*
- [3] Gazizov T.R. *E`lektromagnitny`j terrorizm na rubezhe ty`syacheletij (Electromagnetic terrorism at the turn of the millennium)*. M.: Tomskij gosudarstvenny`j universitet, 2002. 206 c.
- [4] *Issledovanie funkcionirovaniya lokal`noj vy`chislitel`noj seti v usloviyax voz`deystviya sverxkorotkix e`lektromagnitny`x impul`sov / K.Yu. Saxarov, A.A. Sokolov, O.V. Mixeev, V.A. Turkin, A.N. Kornev, S.N. Dolbnya, A.V. Pevnev // Texnologii E`MS. 2006. №3 (18). S. 36–45.*
- [5] Krzikalla R., et al. "Systematic description of the protection capability of protection elements," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1–4.
- [6] Krzikalla R., et al. "Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Istanbul, Turkey, 2003, pp. 1313–1316.
- [7] Krzikalla R. and J.L. ter Haseborg, "SPICE simulations of uwb pulse stressed protection elements against transient interferences," in Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC, Chicago, IL, USA, pp. 977–981, 2005.
- [8] Weber T., et al., "Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses," IEEE Trans. on EMC, vol. 36, no. 3, 2004, pp. 423–430.
- [9] Cui Q., et al., "Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection," in IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), 2012, Bangkok, Thailand, Dec. 2012, pp. 3–5.
- [10] Hayashi H., et al., "ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance," in International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2005 (SISPAD 2005), Tokyo, Japan, Sept. 2005, pp. 99–102.
- [11] Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. "Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference," Journal of Communications Technology and Electronics, no. 5, 2016, pp. 546–550
- [12] Zajkova S.A. *Passivny`e komponenty` radioe`lektronnoj apparatury` (Passive components of radio electronic equipment)*. Posobie. Grodno. GrGU. 2009. 67 s
- [13] Koldunov A.C. *Radiolyubitel`skaya azbuka. Analogovy`e ustrojstva (Amateur radio alphabet. Analog Devices)*. M: SOLON-Press. tom. 2. 2009. 288 s.
- [14] Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russian Federation. May 2015. 5 p.
- [15] Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // X International IEEE Scientific and Technical Conference. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. P. 151–154.
- [16] Surovtsev R.S., Zabolotskij A.M., Nosov A.V. *E`kspierimetal`noe podtverzhdienie vozmozhnosti zashhity` radioe`lektronnoj apparatury` ot sverxkorotkogo impul`sa za schet ego razlozheniya v S-sekcii s licevoj svyaz`yu (Experimental confirmation of the possibility of protecting radioelectronic equipment from an ultrashort pulse by its decomposition in the S-section with face coupling) // Dokl. Tom. gos. un-ta sistem upr. i radioe`lektroniki. 2016. № 3 (19). S. 47–50.*
- [17] Kosteletskii V.P., Zabolotsky A.M., Lakoza A.M. Two-Cascade Shielded Modal Filter for Differential and Common mode Operations // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 4. P. 127-133. doi:10.31114/2078-7707-2021-4-127-133
- [18] Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Research of Additional Pulses Appearing During Ultrashort Pulse Decomposition in a Modal Filter with Edge and Broadside Couplings in Double-Sided Printed Circuit Board // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 4. P. 134-139. doi:10.31114/2078-7707-2021-4-134-139
- [19] Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. vol. 560. pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012110.
- [20] Sagieva I.Y., Noso A.V., Surovtsev R.S. The Influence of Temperature on Microstrip Transmission Line Characteristics // XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Altai, Russia, 29 June - 3 July 2020. P. 191–194.
- [21] Landsberg G.S. *Elementarnyj uchebnik fiziki. Mekhanika. Teplota. Molekulyarnaya fizika (Elementary textbook of physics. Mechanics. Heat. Molecular physics)*. Vol. 1. M.: Nauka. 1985. 606 p.
- [22] Nowotnick M. *Vy`sokotemperaturny`e e`lektronny`e moduli na osnove organicheskix plat [High-temperature electronic modules based on organic boards]*. Texnologii v e`lektronnoj promy`shlennosti. 2009. Ch. 8. S. 51–55.
- [23] Li H-M., Ra C-H., et al. Frequency and Temperature Dependence of the Dielectric Properties of a PCB Substrate for Advanced Packaging Applications // Journal of the Korean Physical Society, no. 3. March 2009. pp. 1096–1099.
- [24] Belousov A.O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. Vol. 2018. P. 1–15.