

УДК 621.3.09

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА,  
ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ШИНУ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

**OPTIMIZATION OF DURATION OF ULTRASHORT PULSE EXCITING THE  
SPACECRAFT POWER SUPPLY BUS**

Рустам Р. Газизов<sup>1,3</sup>, Руслан Р. Газизов<sup>1</sup>, Т. Т. Газизов<sup>1,2</sup>, М. Н. Калинина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Томский государственный педагогический университет, г. Томск, Россия*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Московский государственный университет, г. Москва, Россия*

Rustam R. Gazizov<sup>1,3</sup>, Ruslan R. Gazizov<sup>1</sup>, Timur T. Gazizov<sup>1,2</sup>, M. N. Kalinina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

<sup>2</sup>*Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, Russia*

<sup>3</sup>*National Research University «Higher School of Economics», Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Moscow State University, Moscow, Russia*

**Аннотация.** Приведены принципиальная схема и параметры поперечных сечений макета силовой шины электропитания космического аппарата. Проведена оптимизация длительности воздействующего сверхкороткого импульса генетическим алгоритмом с целью минимизации максимального напряжения вдоль шины. Выполнено по 10 запусков для каждого набора особей и поколений. Приведены графики сходимости результатов для каждого набора параметров генетического алгоритма. Результаты подобных исследований могут быть полезны для оценки наилучшего случая воздействия.

**Ключевые слова:** силовая шина электропитания, сверхкороткий импульс, генетические алгоритмы, электромагнитная совместимость, многопроводные линии передачи, космический аппарат.

**DOI: 10.25206/2310-9793-8-4-19-25**

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современный мир невозможно представить без сложных технических систем. Особенно важным является создание систем повышенной надежности, которые используются в авиационной, военной и космической промышленности. С каждым годом данные системы усложняются и становятся компактнее. Вместе с этим, важным вопросом является отсутствие взаимовлияний компонентов одной системы друг на друга. Актуальным является исследование защиты электронной аппаратуры от различных помех, например, электростатического разряда (ЭСР) или сверхкороткого импульса (СКИ).

В работах [1] и [2] затронуты вопросы защиты аппаратуры космических аппаратов (КА) от помех, в частности от ЭСР. Статьи [3] и [4] показывают актуальность исследования распространения различных сигналов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) и использования зеркальной симметрии для улучшения защиты радиоэлектронных устройств от СКИ. При решении задач моделирования электромагнитной совместимости широко распространено использование алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы (ГА), эволюционные стратегии (ЭС) и другие. Так, при использовании ЭС и ГА выявлен худший случай перекрестной помехи и параметров воздействующего сигнала в печатной плате системы автономной навигации [5]. Оптимизация использована при исследовании модальных фильтров [6]. Рассмотрен системный подход к оптимизации защиты от преднамеренных СКИ на основе многопроводных модальных фильтров [7].

Исследовались максимумы напряжения в одновитковой меандровой линии при изменении длины ее проводников, а также влияния расстояния между проводниками двухвитковой меандровой линии на локализацию максимума напряжения.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ранее разработана силовая шина электропитания (СШЭП) для увеличения помехозащищенности и помехоустойчивости электрической сети КА. Было проведено большое количество исследований по распространению в ней различных сигналов, в том числе синфазного воздействия ЭСР [8]. Помимо поиска оптимальных геометрических параметров СШЭП актуальным является также оптимизация параметров воздействующих сигналов с целью выявления наилучшего или наихудшего случая. Примером может быть минимизация амплитуды максимума, так как неконтролируемый максимум напряжения может являться причиной выхода из строя.

Цель данной работы – выполнить с помощью ГА оптимизацию длительности дифференциального воздействия СКИ на СШЭП по критерию минимизации максимальной амплитуды напряжения вдоль проводников СШЭП.

## III. ТЕОРИЯ

Особенности квазистатического вычисления отклика приведены в [9] и здесь опускаются.

### 1. Исследуемая структура

В качестве исследуемой структуры выбрана СШЭП, которая была рассмотрена ранее [10], однако в данной статье рассматривается СШЭП с измененными параметрами.

На рис. 1 приведена принципиальная схема макета СШЭП (сама шина отмечена пунктирной линией: отрезки МПЛП 5–10). Отрезки МПЛП 1–4 и 15–18 являются боковыми отводами, а 11–14 – центральными. Резисторы имеют сопротивление 50 Ом и отмечены на рис. 1 как  $R_1$ – $R_{12}$ . В качестве дифференциального воздействия выбран трапецевидный СКИ, оно задается источником ЭДС  $U_1$  100 В и  $U_2$  – минус 100 В. Время нарастания и спада моделировались с одинаковыми значениями. Обе переменные изменялись от 0,1 до 10 нс.

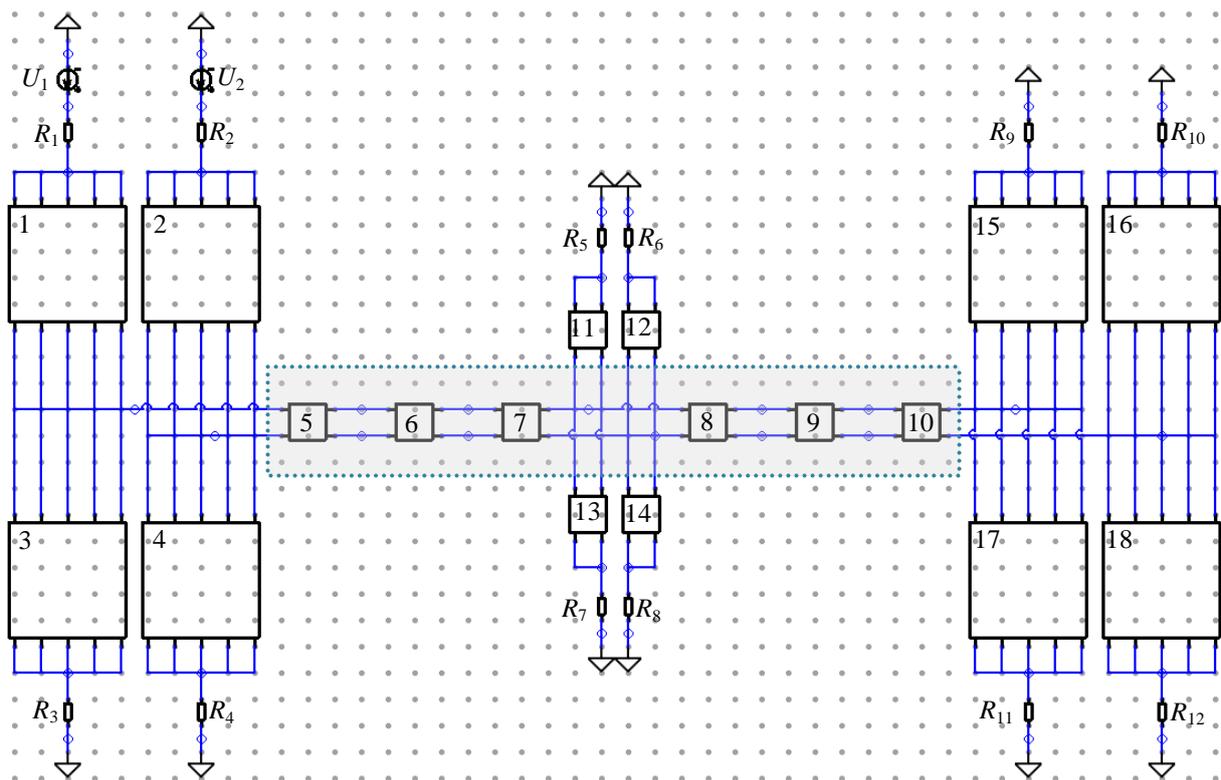


Рис. 1. Принципиальная схема СШЭП с отводами

Ниже приведены поперечные сечения центральных (рис. 2а) и боковых проводных отводов (рис. 2б), толстых (5 и 10) (рис. 2в) и тонких (6–9) (рис. 2г) частей СШЭП, а также увеличенный фрагмент нижней боковой части толстой части СШЭП, изображенной на рис. 2 в (рис. 2д). В табл. 1 приведены геометрические параметры поперечных сечений элементов СШЭП.

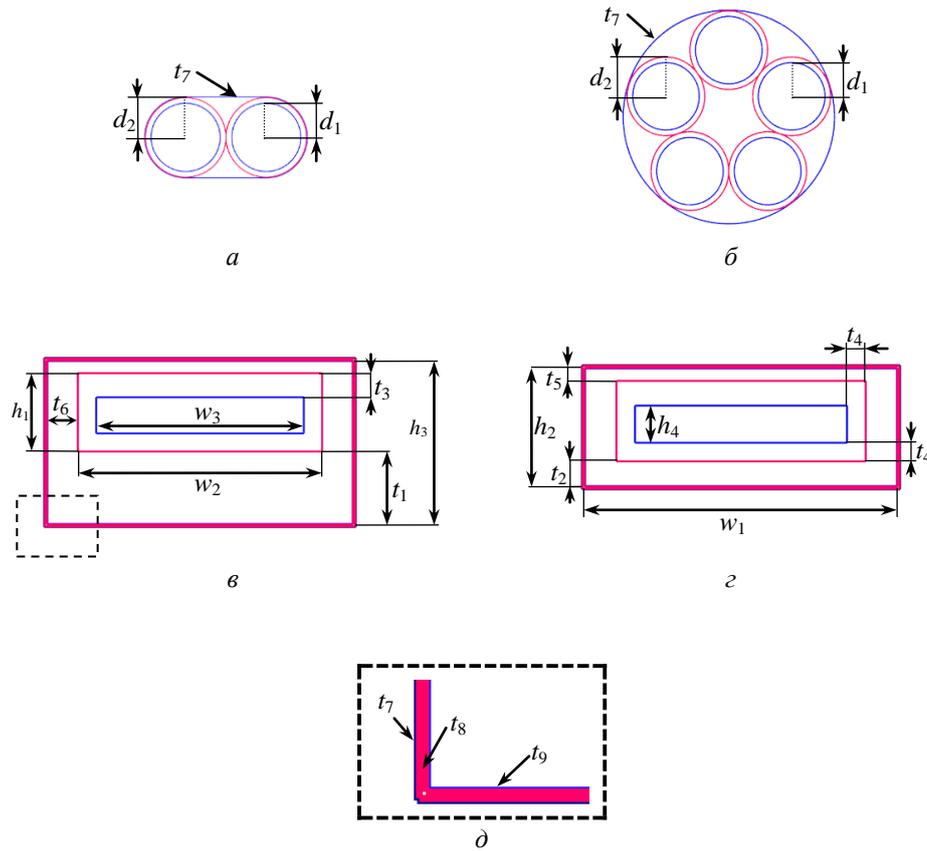


Рис. 2. Поперечные сечения центральных (а) и боковых (б) проводных отводов, толстой (в) и тонкой (з) частей СШЭП, увеличенный фрагмент боковой части толстой части СШЭП (д)

Погонные коэффициенты матриц электромагнитной индукции ( $\mathbf{L}$ , нГн/м) и электростатической индукции ( $\mathbf{C}$ , пФ/м):

– для боковых отводов:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 78,86 & 17,63 & 5,65 & 5,62 & 17,57 \\ 17,63 & 78,68 & 17,63 & 5,62 & 5,62 \\ 5,65 & 17,63 & 78,86 & 17,57 & 5,62 \\ 5,62 & 5,62 & 17,57 & 78,62 & 17,54 \\ 17,57 & 5,62 & 5,62 & 17,54 & 78,62 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 241,92 & -53,92 & -1,35 & -1,35 & -53,65 \\ -53,92 & 243,02 & -53,92 & -1,34 & -1,34 \\ -1,36 & -53,92 & 241,92 & -53,65 & -1,35 \\ -1,35 & -1,34 & -53,65 & 243,03 & -53,75 \\ -53,65 & -1,34 & -1,35 & -53,75 & 243,03 \end{bmatrix};$$

– для центральных отводов:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 44,17 & 4,77 \\ 4,77 & 44,17 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 448,55 & -51,78 \\ -51,78 & 448,55 \end{bmatrix};$$

– для центральной части СШЭП:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 4,71 & 4,71 \\ 4,71 & 92,88 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 5663,31 & -670,42 \\ -670,42 & 157,4 \end{bmatrix};$$

– для боковых частей СШЭП:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 4,23 & 4,23 \\ 4,23 & 110,67 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 5784,06 & -449,29 \\ -449,29 & 106,41 \end{bmatrix}.$$

ТАБЛИЦА 1  
ГЕОМТЕРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОПЕРЧЕННЫХ СЕЧЕНИЙ СШЭП И ПРОВОДНЫХ ОТВОДОВ

Рисунок	Описание	Обозначение	Значение, мм
2 а, 2 б	Радиус проводного отвода	$d_1$	3
2 а, 2 б	Радиус проводного отвода с диэлектрическим слоем	$d_2$	3,5
2 г	Ширина внешнего проводника	$w_1$	25
2 в	Ширина диэлектрика	$w_2$	20
2 в	Ширина внутреннего проводника	$w_3$	17
2 в	Высота внутреннего диэлектрика	$h_1$	6,5
2 г	Высота внешнего проводника тонкой части	$h_2$	9,5
2 в	Высота внешнего проводника толстой части	$h_3$	13,5
2 г	Высота внутреннего проводника	$h_4$	3
2 в	Нижняя толщина внешнего проводника в его толстой части	$t_1$	6
2 г	Нижняя толщина внешнего проводника в его тонкой части	$t_2$	2
2 в	Толщина внутреннего диэлектрика сверху	$t_3$	2
2 г	Толщина внутреннего диэлектрика снизу и по бокам	$t_4$	1,5
2 г	Верхняя толщина внешнего проводника	$t_5$	1
2 в	Толщина боковой стенки внешнего проводника	$t_6$	2,5
2 а, 2 б, 2 д	Слой LMAMS	$t_7$	0,06
2 д	Покрывающий диэлектрический слой лака	$t_8$	0,05
2 д	Слой полиимидной пленки	$t_9$	0,15

### 2. Алгоритм оптимизации и его параметры

В качестве алгоритма оптимизации использовался ГА со следующими параметрами: коэффициент кроссовера – 0,1, коэффициент мутации – 0,5. Наборы чисел особей и поколений ГА, а также их произведения, определяющие общее число вычисления целевой функции, показаны в Табл. II. Оптимизировалась общая длительность сигнала, при условии, что время нарастания и спада одинаковые, т.е. выполнена оптимизация с двумя переменными ГА, где  $x_1$  – длительность плоской вершины сигнала,  $x_2$  – время нарастания или спада. Значения  $x_1$  и  $x_2$  – изменялись от 0,01 нс до 10 нс. Таким образом, общая длительность  $x_1 + 2x_2$ . Цель оптимизации – уменьшить амплитуду напряжения в СШЭП: вдоль каждого проводника каждого отрезка МПЛП. Моделирование проводилось в системе компьютерного моделирования TALGAT.

ТАБЛИЦА 2  
ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ

$N$	Число особей	Число поколений
15	3	5
50	5	10
100	5	20
200	8	25

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты оптимизации приведены в табл. 3 и 4 Для подтверждения сходимости результатов ГА запускался 10 раз для каждого набора параметров.

ТАБЛИЦА 3  
МАКСИМУМЫ НАПРЯЖЕНИЯ (МВ) ДЛЯ К-ГО ЗАПУСКА ГА С N ВЫЧИСЛЕНИЯМИ

$K \backslash N$	15	50	100	200
1	10,20	10,02	8,81	8,90
2	10,14	9,36	9,09	8,77
3	11,03	11,85	9,09	8,81
4	9,38	10,14	8,86	8,86
5	11,05	10,08	9,04	8,82
6	13,09	9,33	8,94	8,62
7	10,76	10,08	8,86	8,77
8	12,18	9,85	9,18	8,77
9	10,02	8,77	8,82	8,95
10	10,90	9,00	8,90	8,81

ТАБЛИЦА 4  
ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИГНАЛА (НС) ДЛЯ К-ГО ЗАПУСКА ГА С N ВЫЧИСЛЕНИЯМИ

$K \backslash N$	15		50		100		200	
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$
1	3,30	8,58	1,67	8,73	0,33	9,96	0,44	9,83
2	1,10	8,65	1,38	9,48	0,91	9,67	0,24	10,00
3	4,46	7,96	3,75	7,40	0,68	9,66	0,28	9,93
4	1,39	9,35	3,05	8,65	0,44	9,90	0,15	9,90
5	3,14	9,41	1,99	8,70	0,16	9,69	0,27	9,97
6	6,96	6,73	1,48	9,42	0,55	9,79	0,29	9,88
7	1,95	9,81	1,03	8,71	0,11	9,91	0,11	10,00
8	3,56	7,21	2,63	8,92	0,34	9,53	0,17	10,00
9	1,40	8,75	0,10	9,99	0,14	9,97	0,22	9,79
10	2,68	8,04	0,64	9,83	0,23	9,85	0,10	9,96

Для наглядности значения  $U_{\max}$  в зависимости от номера запуска ГА для разных значений  $N$  приведены на рис. 3. На рис. 4 приведены две формы сигналов: до оптимизации ( $f$ ) и после ( $f_{opt}$ ), для минимального напряжения (8,62 мВ). Общая длительность для  $f$  была 3 нс, а длительности нарастания, спада были одинаковые. Общая длительность  $f_{opt}$  составила 20,054 нс, длительность нарастания и спада стали по 9,88 нс, а плоской вершины – 0,294 нс.

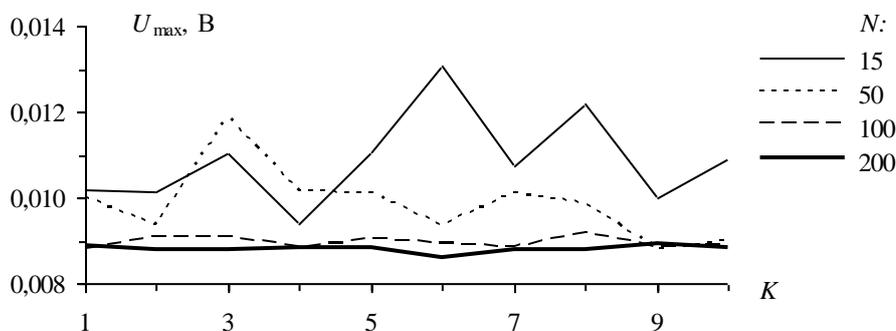
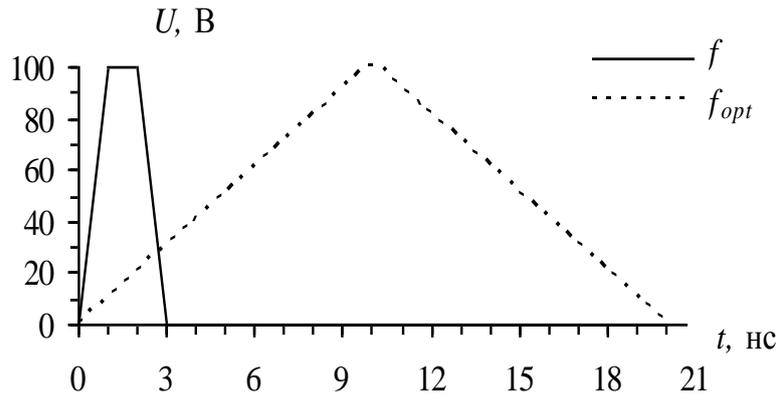


Рис. 3. Максимум напряжения в зависимости от  $K$

Рис. 4. Формы сигнала до ( $f$ ) и после ( $f_{opt}$ ) оптимизации

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим результаты оптимизации с помощью ГА (Табл. III). При  $N=15$  при одном запуске ГА  $U_{max} < 10$  мВ. При  $N=50$   $U_{max} < 10$  мВ при 5 запусках ГА. При  $N=100$  при 6 запусках ГА  $U_{max} < 9$  мВ. При  $N=200$  во всех случаях запуска ГА  $U_{max} < 9$  мВ, при этом достигнуто минимальное значение  $U_{max}=8,62$  мВ. Соответственно, чем больше значение  $N$ , тем меньше максимум напряжения. Из рис. 3 видно, что при увеличении  $N$  результат оптимизации изменяется меньше. Так, при  $N=15$ , разница достигает 31%, а при  $N=100$  или 200, это изменение лишь около 4%.

Из рис. 4 видно, что после оптимизации форма СКИ стала близка к треугольной, а из табл. 4 видна сходимость времени нарастания и спада к 10 нс.

#### VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оптимизация длительности дифференциального воздействия СКИ на СШЭП. При оптимизации использовались 4 набора с увеличивающимся числом особей и поколений ГА. Проведено 10 запусков ГА. Получен минимальный максимум 8,62 мВ при  $N=200$ . Таким образом, показана возможность уменьшения максимума напряжения примерно в 1,5 раза при изменении только параметров СКИ. Подобное исследование может быть полезно для оценки наихудшего случая воздействия. В перспективе целесообразно провести оптимизацию геометрических параметров СШЭП, а также при использовании других методов оптимизации, например, ЭС.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-2652.2019.9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogorad A. L., Likar J. J., Voorhees C. R., Herschitz R. Electrostatic Discharge Induced Momentum Impulse From Charged Spacecraft Surfaces // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. No. 53(6). P. 3607–3609. DOI: 10.1109/tns.2006.885108.
2. Ryden K. A., Jolly H., Frydland A., Morris P. A compact electrostatic charging monitor for spacecraft //1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 99 (Cat. № 99TH8471). DOI: 10.1109/radecs.1999.858559.
3. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // Symmetry. 2019. Vol. 11(7), no. 883. P. 1–25.
4. Chernikova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Ultrashort pulse decomposition in reflection symmetric meander line of four cascaded half-turns // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 597, no. 1. P. 1–6.
5. Gazizov R. R., Zabolotsky A. M., Gazizov R. R. Use of genetic algorithm and evolution strategy when revealing the worst case effects of crosstalk propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system // 19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Erlagol, Altai, June 29–July 3, 2018. P. 93–97.

6. Belousov A. O., Gazizov T. R. Optimization of multiconductor modal filters using various criteria with different weighting coefficients // Journal of physics: conference series. 2018. Vol. 1015, no. 1. P. 1–6.
7. Belousov A., Gazizov T. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. 2018. Vol. 2018. P. 1–15.
8. Gazizov Rustam R., Gazizov Ruslan R., Gazizov T.T. Simulating the influence of electrostatic discharge on a spacecraft power supply bus // Proc. of IEEE 2019 International multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. P. 0269–0272.
9. Gazizov R. R., Gazizov T. T., Gazizov T. R. Detection and localization of interference and useful signal extreme points in closely coupled multiconductor transmission line networks // Symmetry. 2019. Vol. 11, no. 1209. P. 1–33.
10. Gazizov Rustam R., Gazizov Ruslan R., Gazizov T.T. Simulation the Effect of Common-mode Excitation of Electrostatic Discharge on the Shielded Power Supply Bus Conductors // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). 2020. P. 3. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067395.

УДК 621.391.8:621.396.9

## АНАЛИЗ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ТАКТОВОЙ И ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГММС-СИГНАЛА

### ANALYSIS OF THE JOINT FUNCTIONING OF THE TIMING AND PHASE SYNCHRONIZATION ALGORITHMS OF THE GMSK-SIGNAL

Е. В. Дереча, Д. Д. Привалов

*Институт радиофизики и физической электроники, ИРФЭ ОНЦ СО РАН, г. Омск, Россия*

E. V. Derecha, D. D. Privalov

*Institute of Radiophysics and Physical Electronics, IRPE OSC SB RAS, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В статье приводится анализ алгоритмов фазовой и тактовой синхронизации ГММС-сигнала с изменяющимся частотным сдвигом без использования известных данных в сигнале, основанный на возведении в степень. Для устранения изменяющегося частотного сдвига используется петля обратной связи с астатизмом первого порядка. Показана возможность одновременного функционирования указанных алгоритмов, представлена совместная схема их реализации. Рассчитаны численные зависимости дисперсий оценок фазы и тактовой частоты от отношения сигнал/шум при различных значениях коэффициента в петле обратной связи и длины фильтра.

**Ключевые слова:** системы спутниковой связи, тактовая синхронизация, фазовая синхронизация, ГММС модуляция.

DOI: 10.25206/2310-9793-8-4-25-30

#### I. ВВЕДЕНИЕ

В реальных системах спутниковой связи неизбежно влияние множества дестабилизирующих факторов. К нарушению целостности структуры сигналов приводит наличие аддитивных шумов и помех. Нестабильность опорных генераторов передающих и принимающих устройств вызывает рассогласование их временных шкал и, как следствие, тактовых частот. Эффект Доплера в результате перемещения в пространстве радиотехнических систем требует поиска по частоте и сопровождения по фазе принимаемого сигнала.

#### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В известной литературе рассмотрено множество вариантов решения данных задач как по отдельности, так и в совокупности [1]. Особенно возникает интерес при реализации радиотехнических систем, обеспечивающих передачу данных через негеостационарные спутники-ретрансляторы. В таком случае на приемной сто-