

УДК 621.3.09

**МИНИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИЛОВУЮ ШИНУ
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ДЛИНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

**MINIMIZATION OF THE DIFFERENTIAL MODE PULSE INTERFERENCE IN THE SPACECRAFT
POWER SUPPLY BUS BY VARYING ITS LENGTH USING GENETIC ALGORITHM**

Рустам Р. Газизов¹, Руслан Р. Газизов², Т. Т. Газизов³

¹*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

³*Томский государственный педагогический университет, г. Томск, Россия*

Rustam R. Gazizov¹, Ruslan R. Gazizov², Timur T. Gazizov³

¹*National Research University «Higher School of Economics», Moscow, Russia*

²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

³*Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, Russia*

Аннотация. В работе показана актуальность выявления и локализации экстремумов сигнала вдоль проводников многопроводных линий передачи МПЛП. Выполнена оптимизация длины силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата по критерию минимизации наибольшего напряжения в СШЭП. Использовано дифференциальное воздействие трапецевидного импульса. Выполнено сравнение двух подходов к оптимизации длины СШЭП с помощью генетического алгоритма (ГА), отличающиеся разным набором особей и поколений. Показано, что при одинаковом количестве итераций ГА, выбор значений особей и поколений влияет незначительно. С помощью ГА удалось уменьшить максимальное значение напряжения в 270 раз.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм, максимум напряжения, дифференциальное воздействие, силовая шина электропитания.

DOI: 10.25206/2310-9793-8-4-12-18

I. ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование при разработке современных радиоэлектронных устройств (РЭУ) очень важно, поскольку позволяет быстро проверить их конструкцию и устранить недочеты, кроме того, оно требует намного меньше временных, и финансовых затрат при натурном эксперименте. В том числе, при разработке и исследовании РЭУ необходимо уделять внимание различным паразитным помехам и перекрестным наводкам, возникающим между проводниками РЭУ, и для более точного результата учитывать все взаимосвязи между проводниками [1]. Оно важно для диагностики, которая должна проводиться на раннем этапе и быть направленной на выявление возможных уязвимостей печатных плат, например, выявление мест с превышением амплитуд напряжения или тока [2, 3]. Своевременное точное моделирование позволит исключить влияние электромагнитных помех на работу высокочувствительного оборудования [4], а также уменьшить последствия преднамеренных силовых воздействий, которые выводят РЭУ из строя [5, 6]. Сверхширокополосные импульсы, сверхкороткие импульсы [7] и электростатический разряд (ЭСР) [8] могут являться такими воздействиями. В связи с этим, необходимо учитывать полезные и помеховые сигналы во время диагностики печатных плат. Более того, это особенно важно в аэрокосмической отрасли, поскольку сбой, произошедший на одной из частей оборудования космического аппарата, может вызвать потерю самого аппарата [9, 10].

В настоящее время активно ведутся разработка и усовершенствование технологий в космической отрасли. В частности, наблюдаются тренды к миниатюризации компонентов и повышению частот полезных сигналов. Если относительно недавно спутники имели такой размер и вес, что их запускали по 1–2 иногда по 3 штуки, то теперь известен, в частности, проект Starlink от компании SpaceX [11], в котором за один запуск ракеты отправляются сразу 60 спутников. Это говорит о том, что миниатюризация достигла такого состояния, когда речь идет уже не о сантиметрах, а о миллиметрах [12, 13]. При разработке подобных устройств для различных

задач активно используют оптимизацию: например, для разработки новых внутренних конструкций [14], самого спутника [15] и др. Опять же, тесная компоновка требует ужесточения требований к обеспечению электромагнитной совместимости подобных устройств.

Ранее были разработаны математические модели, алгоритмы и программный комплекс для вычисления отклика в любой точке вдоль проводников цепи из многопроводных линий передачи (МПЛП) произвольной сложности [16]. Проведен ряд исследований шины печатной платы космического аппарата [17, 18] и силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата [19, 20]. Кроме того, выполнены исследования шины печатной платы с применением оптимизации с помощью генетического алгоритма (ГА) и эволюционной стратегии для поиска экстремума напряжения [21]. Однако, оптимизация к СШЭП космического аппарата не применялась, кроме того, не исследован вопрос, как на результаты такой оптимизации повлияет выбор числа особей и поколений ГА (если количество особей будет очень мало и будет отличаться от количества поколений в 100 раз, либо их число будет отличаться только в 4 раза).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В первую очередь, целесообразно выполнить оптимизацию длительности отрезков МПЛП в СШЭП для уменьшения максимального напряжения при дифференциальном воздействии на ее проводники. Поэтому, цель данной работы – выполнить оптимизацию длин отрезков МПЛП в СШЭП для минимизации максимального напряжения, а также исследовать влияние выбора числа особей и поколений ГА на результаты оптимизации.

III. ТЕОРИЯ

1. Исследуемая структура

Для исследования взята СШЭП космического аппарата. Фотография макета СШЭП с подключенными к ней проводными отводами приведена на рис. 1. Ее принципиальная схема представлена на рис. 2. Прямоугольником выделены отрезки МПЛП самой СШЭП, без отводов. Длины отрезков 1–4 и 15–18 равны 0.5 м, а отрезков 11–14 – 0.25 м. Длины отрезков 5–10 изменялись с помощью ГА и будут описаны в следующем подразделе. Все нагрузки (R_1 – R_{12}) полагаются равными 50 Ом. Поперечные сечения СШЭП и отводов представлены на рис. 3 и 4, соответственно. Использованный вариант СШЭП представлен с экранирующим слоем LMAMS. Где подключаются боковые проводные отводы, СШЭП имеет толстое поперечное сечение (рис. 3а), а в других местах – тонкое (рис. 3б). Геометрические параметры поперечных сечений приведены в табл. 1, при этом относительная диэлектрическая проницаемость изолирующего материала проводников была взята «2», а для экранирующего проводника была «1».

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

– для боковых отводов (отрезки 1–4 и 15–18):

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

– для центральных отводов (отрезки 11–14):

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 44,1 & 4,76 \\ 4,76 & 44,1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 448,43 & -49,31 \\ -49,31 & 448,43 \end{bmatrix}.$$

– для центральной части СШЭП (отрезки 6–9):

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 4,71 & 4,71 \\ 4,71 & 92,88 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 5663,3 & -670,4 \\ -670,4 & 157,4 \end{bmatrix}.$$

– для боковых частей СШЭП (отрезки 5 и 10):

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 4,22 & 4,22 \\ 4,22 & 110,66 \end{bmatrix},$$

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

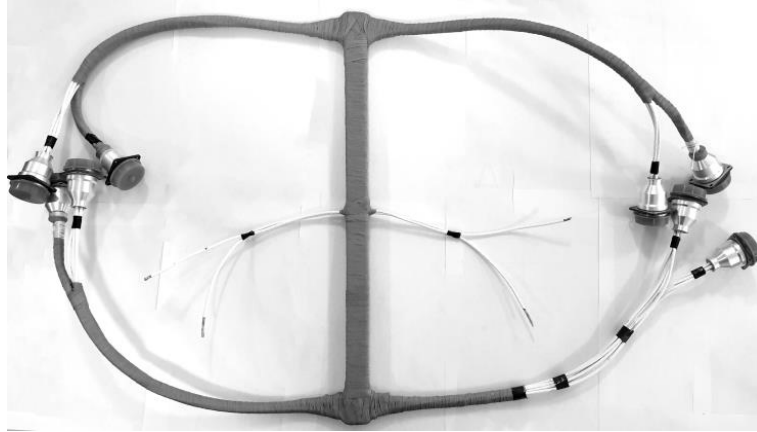


Рис. 1. СШЭП с подключенными проводными отводами

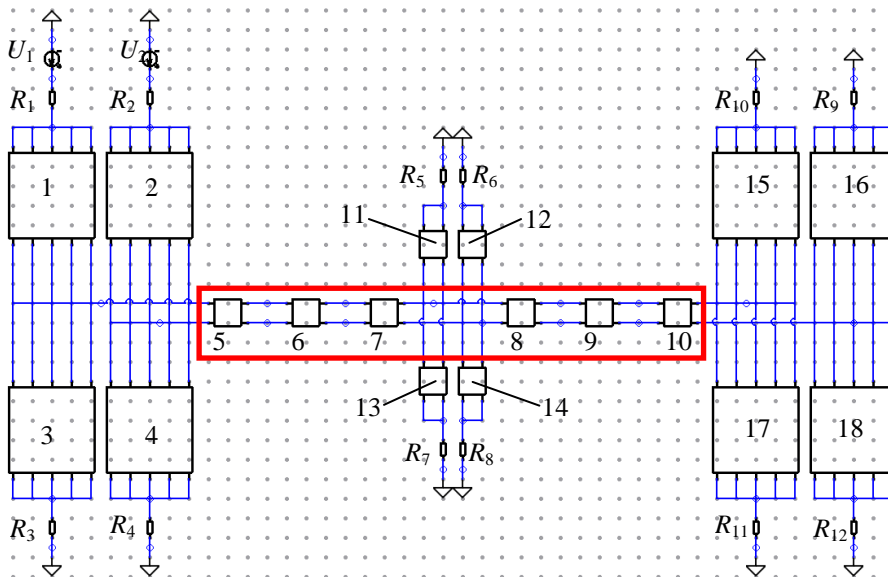


Рис. 2. Принципиальная схема СШЭП с подключенными проводными отводами

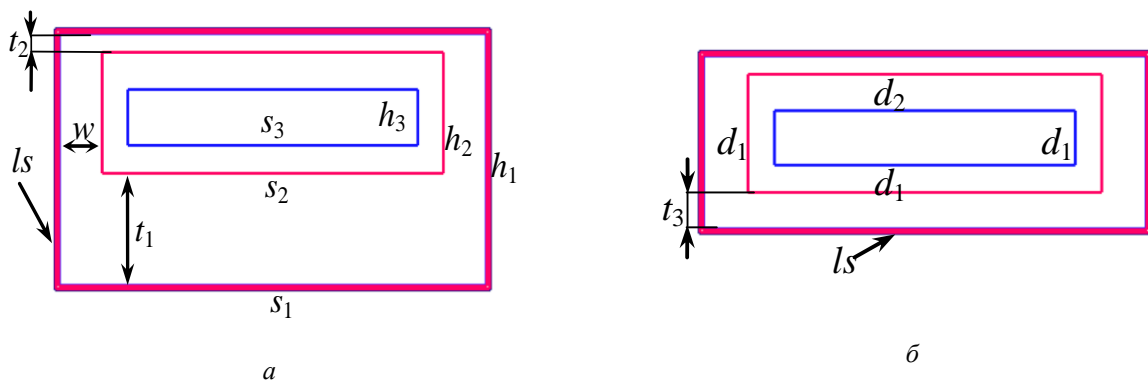


Рис. 3. Поперечные сечения СШЭП в толстой (отрезки 5 и 10 – а) и тонкой (отрезки 6–9 – б) частях



Рис. 4. Поперечные сечения центральных (отрезки 11–14 – *a*) и боковых (отрезки 1–4 и 15–18 – *б*) проводных отводов

ТАБЛИЦА 1
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОПЕРЧЕННЫХ СЕЧЕНИЙ С РИС. 3 И 4

Описание	Обозначение	Значение, mm
Ширина внешнего проводника	s_1	25
Ширина диэлектрика	s_2	20
Ширина внутреннего проводника	s_3	17
Высота внешнего проводника	h_1	13,5
Высота диэлектрика	h_2	6,5
Высота внутреннего проводника	h_3	3
Нижняя толщина внешнего проводника в его толстой части (рис. 4 <i>a</i>)	t_1	6
Верхняя толщина внешнего проводника	t_2	1
Нижняя толщина внешнего проводника в его тонкой части (рис. 4 <i>б</i>)	t_3	2
Толщина боковой стенки внешнего проводника	w	2,5
Радиус проводного отвода	r_1	3,0
Радиус проводного отвода с диэлектрическим слоем	r_2	3,5
Слой LMAMS	ls	0,06

2. Параметры воздействия

Для исследования использовано дифференциальное воздействие трапециевидного импульса, где U_1 имеет амплитуду ЭДС 100 В, а U_2 – минус 100 В. Время нарастания и спада по 1 нс, а плоской вершины – 10 нс. Источники напряжения (U_1 и U_2) включены в начале каждого проводника, как показано на рис. 2.

3. Параметры оптимизации

В качестве алгоритма оптимизации использован простой ГА с бинарным кодированием. Параметры ГА: коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссинговера – 0,5. Число особей в популяции и количество поколений не изменялось. Оптимизировалась длина СШЭП, а именно длины отрезков МПЛП 5–10. Длины отрезков МПЛП 5 и 10 присвоены переменной l_1 , отрезков МПЛП 6 и 9 – l_2 , отрезков МПЛП 7 и 8 – l_3 . В процессе оптимизации переменные ГА (l_1 , l_2 , l_3) изменялись в диапазоне от 0.01 м до 0.5 м. Таким образом, общая длина СШЭП (l) определяется как:

$$l = 2(l_1 + l_2 + l_3) \quad (1)$$

Целью оптимизации являлось уменьшение максимума напряжения вдоль проводников СШЭП.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сначала выполнена оптимизация при увеличении количества вычислений ГА (20, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 700). Максимальные значения напряжения (U_{\max}) вдоль проводников СШЭП в результате этой оптимизации показаны на рис. 5 в зависимости от количества вычислений (c). На рис. 6 показано изменение значений переменных ГА при увеличении числа вычислений.

Как видно из рис. 5, после 400 вычислений результат оптимизации не изменяется. Поэтому далее выполнено сравнение двух подходов к оптимизации, с целью изучить, как влияет выбор количества особей и числа поколений на результат оптимизации. В первом подходе использовано количество поколений (200) много большее, чем количество особей (2), а во втором они были сравнимы: 10 особей и 40 поколений. Выбор именно таких параметров ГА обоснован тем, чтобы общее количество вычислений ГА было равным 400 в обоих подходах, поскольку при нем достигается сходимость результатов.

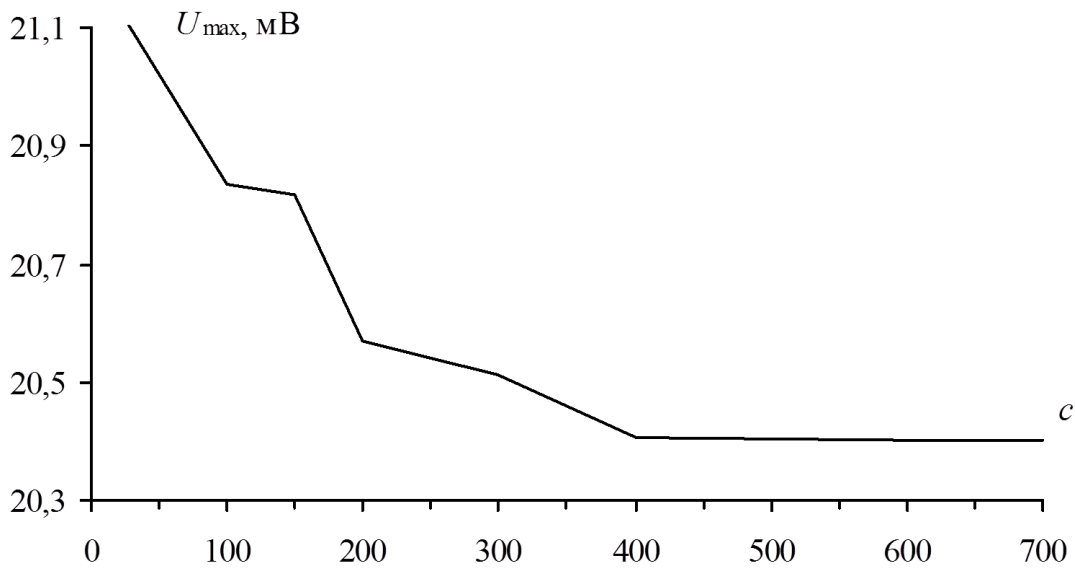


Рис. 5. Зависимость максимального значения напряжения от количества вычислений ГА

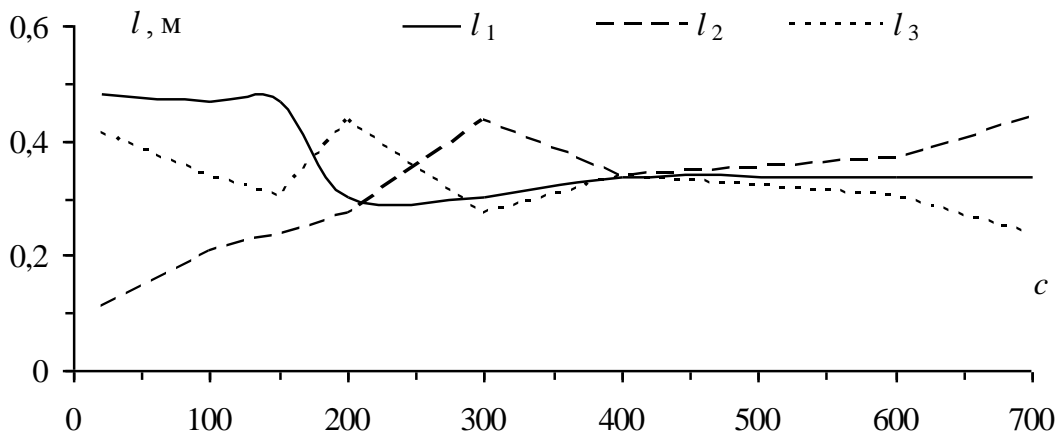


Рис. 6. Зависимость значений переменных ГА, при разном количестве вычислений

Для повышения точности результатов в каждом подходе к оптимизации выполнено по 10 запусков ГА. На рис. 7 показана зависимость U_{\max} от номера запуска ГА (n).

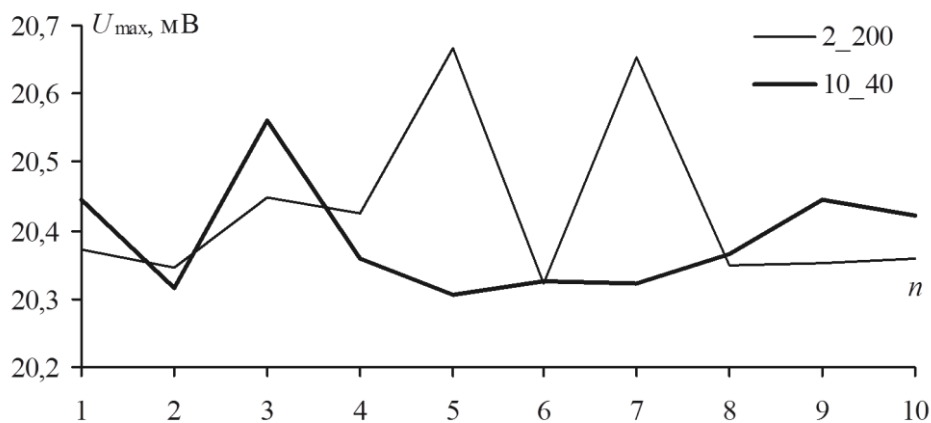


Рис. 7. Максимальные значения напряжения, при разном количестве итераций ГА

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим результаты оптимизации, а именно изменение максимального значения напряжения в зависимости от увеличения числа итераций ГА (рис. 5). Видно, что максимальное значение напряжения постепенно уменьшается от 21,13 мВ до 20,4 мВ при увеличении числа итераций до 400, однако после (600 и 700 итераций) остается на одном уровне. Это позволяет сделать вывод, что при данном числе итераций ГА находит глобальный минимум и далее нет необходимости увеличивать итерации. Для сравнения, без оптимизации максимальное значение напряжения составляет 5,42 В, таким образом, в результате оптимизации максимальное значение напряжения удалось уменьшить в 270 раз.

Обратим внимание на рис. 6, где показано, как изменяются значения переменных ГА. Видно, что до 200 итераций разброс переменных довольно сильный, однако затем он становится меньше и при числе итераций 400 переменные имеют одинаковые значения. Тем не менее, далее снова наблюдается постепенное увеличение разброса значений. Примечателен факт, что даже при изменении значения длин отрезков (после числа итераций 400) максимум напряжения не изменяется (как видно на рис. 5).

Рассмотрим результаты сравнения двух подходов к оптимизации (рис. 7). В первом подходе (при числе особей 2 и количестве поколений 200) наблюдается более сильное изменение значений максимума напряжения при разных запусках, нежели при числе особей 10 и количестве поколений 40. Однако в процентном соотношении эти изменения составляют около 1,5%, что очень мало. Кроме того, значения в обоих подходах практически не отличаются. Поэтому можно сделать вывод о том, что такой выбор параметров ГА не влияет на результаты оптимизации.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате работы выполнена оптимизация длины СШЭП по критерию минимизации максимального значения напряжения вдоль проводников СШЭП. Выполнено сравнение двух подходов к оптимизации, отличающихся разным набором особей и поколений, при равном количестве итераций ГА. Показано, что в результате использования оптимизации удалось уменьшить амплитуду максимального напряжения в 270 раз. Кроме того, выявлено, что выбор разного числа особей и поколений незначительно влияет на результаты оптимизации при условии одинакового числа итераций ГА.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul C. Analysis of multiconductor transmission lines. New York, NY, USA: Wiley, 2007. 821 p.
2. Cao Y. S., Wang Y., Jiang L., Ruehli A. E., Fan J., Drewniak J. L. Quantifying EMI: a methodology for determining and quantifying radiation for practical design guidelines // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2017. Vol. 59, no. 5. P. 1424–1431.

3. Paoletti U. On the noise path determination with the noise source modulation technique // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2017. Vol. 59, no. 5. P. 1400–1407.
4. Li P., Huang D., Ruan J., Niu X. EM measurements between MV switching sources and colocated sensitive circuit // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 2015. Vol. 57, no. 3. P. 513–521. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2400230.
5. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // *Syst. Des. Assessment Notes.* July 2014. No. 41. P. 1–48.
6. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // *J. Commun. Technol. Electron.* 2016. Vol. 61, no. 5. P. 546–550. DOI: 10.1134/S1064226916050053.
7. Gaynutdinov R. R., Chermoshentsev S. F. Study immunity to disturbance of electronic system aircraft by influences of intentional ultrashort electromagnetic pulses // *2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Eng. (APEDE), Saratov, Russia, 2016.* P. 1–6. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878983.
8. Moser K., Andersen A., Dennison J. R. Dependence of electrostatic field strength on voltage ramp rate for spacecraft materials // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* Aug. 2017. Vol. 45, no. 8. P. 2036–2039. DOI: 10.1109/TPS.2017.2717873.
9. Huang L., Gao C., Guo F., Sun C. Lightning indirect effects on helicopter: numerical simulation and experiment validation // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* Aug. 2017. Vol. 59, no. 4. P. 1171–1179. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2651900.
10. Cabello M. R. [et al.]. SIVA UAV: A Case Study for the EMC Analysis of composite air vehicles // *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* Aug. 2017. Vol. 59, no. 4. P. 1103–1113. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2648507.
11. Sayin A., Cherniakov M., Antoniou M. Passive radar using Starlink transmissions: A theoretical study // *2019 20th Int. Radar Symp. (IRS), Ulm, Germany, 2019.* P. 1–7. DOI: 10.23919/IRS.2019.8768105.
12. Mustapha B. M., Ikpo V. C., Hussaini A. S., Elfergani I.T.E., Abd-Alhameed R.A., Rodriguez J. Demonstration of structural changes in variable structure control using state space approach // *2017 Internet Techn. and Appl. (ITA), Wrexham, 2017.* P. 320–323. DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101962.
13. Botero A. Y., Rodríguez J. S., Serna J. G., Gómez A., García M. J. Design, construction and testing of a data transmission system for a mid-power rocket model // *2017 IEEE Aerosp. Conf., Big Sky, MT, 2017.* P. 1–14. DOI: 10.1109/AERO.2017.7943739.
14. Abay M. M., Atak A., İzgü O., Şahin M. Design and optimization of innovative CFRP central cylinder for satellite // *2019 9th Int. Conf. on Recent Adv. in Space Techn. (RAST), Istanbul, Turkey, 2019.* P. 103–107. DOI: 10.1109/RAST.2019.8767825.
15. Chen C., Sun Z., Zhong W. The satellite optimization design using collaborative optimization method based on normal cloud model // *Proc. of 2011 Int. Conf. on Electronic & Mech. Eng. and Inf. Techn., Harbin, 2011.* P. 3445–3448. DOI: 10.1109/EMEIT.2011.6023824.
16. 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. 1209, no. 11. P. 1–33. DOI: 10.3390/sym11101209.
17. Gazizov R. R., Zabolotsky A. M., Gazizov T. T., Belousov A. O. Influence of ultrashort pulse duration on its peak values localization in PCB of spacecraft autonomous navigation system // *18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechn. and Electron Devices (EDM 2017), Erlagol, Altai, 29 June–3 July. 2017.* P. 69–74. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981710.
18. Gazizov R. R., Muhambetzhanova B. S., Gazizov T. T., Kvasnikov A. A. Diagnostics of the printed circuit board bus of a spacecraft autonomous navigation system with using the N-norms // *IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng.* 2019. Vol. 560. P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012017.
19. Gazizov R. R., Gazizov T. T., Gazizov T. R. The influence of pulse rise and fall times on N-norm portraits along power supply bus // *Proc. of IEEE 2019 Int. Multi-Conf. on Eng., Comput. and Inf. Sci. (SIBIRCON 2019), Tomsk, Russia, Oct. 21–27.* P. 0280–0283. DOI: 10.1109/SIBIRCON.48586.2019.8958177.
20. Gazizov Rustam R., Gazizov Ruslan R., Gazizov Timur T. Simulating the influence of electrostatic discharge on a spacecraft power supply Bus // *Proc. of IEEE 2019 Int. Multi-Conf. on Eng., Comput. and Inf. Sci. (SIBIRCON 2019), Tomsk, Russia, Oct. 21–27, 2019.* P. 0269–0272. DOI: 10.1109/SIBIRCON.48586.2019.8957863.
21. Gazizov Ruslan R., Zabolotsky Alexander M., Gazizov Rustam 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 Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechn. and Electron Devices (EDM 2018), Erlagol, Altai, 29 June – 3 July. 2018.* P. 93–97. DOI: 10.1109/EDM.2018.84350.