

Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости

Д. А. Абрамешин, Е. Д. Пожидаев, В. С. Саенко, С. Р. Тумковский

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

Dabrameshin@hse.ru

Аннотация. На космические аппараты воздействуют электроны космической плазмы, что обуславливает электризацию их диэлектрических материалов. В результате возникают электростатические разряды, приводящие к отказам в работе бортовой радиоэлектроники, уменьшающим сроки активного существования космических аппаратов. Один из перспективных методов защиты от воздействия электростатических разрядов – применение композитных полимерных диэлектриков с повышенной проводимостью. В работе изложены результаты моделирования характеристик широкополосного усилителя, выполненного на печатной плате с использованием композитного диэлектрика повышенной проводимости. В модель протекающих электрических процессов добавлены сопротивления, характеризующие токовые утечки с узлов схемы на нулевой проводник, обусловленные уменьшением удельного объемного сопротивления материала печатной платы. Проведены компьютерное моделирование широкополосного усилителя и экспериментальное исследование его рабочих характеристик в полосе рабочих частот 0,5–70 МГц. Показано, что изменение полосы пропускания и коэффициента усиления происходит только тогда, когда проводимость становится выше $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Результаты экспериментального исследования широкополосного усилителя показали, что предложенная модель учета удельного объемного сопротивления материала печатной платы адекватно описывает его характеристики. При проводимости $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ исключается возникновение электростатических разрядов, что указывает на возможность защиты широкополосных усилителей в составе радиоэлектронных устройств космических аппаратов от электризации при использовании композитных диэлектриков повышенной проводимости.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, радиоэлектронные устройства космических аппаратов, радиационная электризация, электростатические разряды, композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Для цитирования: Абрамешин Д. А., Пожидаев Е. Д., Саенко В. С., Тумковский С. Р. Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 635–644. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-635-644>

Original article

Modeling of a broadband amplifier made on a printed circuit board with an increased conductivity dielectric

D. A. Abrameshin, E. D. Pozhidaev, V. S. Saenko, S. R. Tumkovskiy

National Research University “Higher School of Economics”, Moscow,
Russia

Dabrameshin@hse.ru

Abstract. The electrons of the cosmic plasma act on spacecraft, causing the electrification of their dielectric materials. The result of the accumulation of charge is the occurrence of electrostatic discharges leading to failures in the operation of on-board radio electronics, and this phenomenon significantly reduces the duration of the active existence of spacecraft. One of the promising methods of protection against the effects of electrostatic discharges is the use of composite polymer dielectrics with increased conductivity. In this work, the results of modeling the characteristics of a broadband amplifier made on a printed circuit board using such a composite dielectric are presented. The resistances have been added to the model of electrical processes occurring in this amplifier, characterizing current leaks from the circuit nodes to the zero conductor, due to a decrease in the specific volume resistance of the printed circuit board material. A computer simulation of a broadband amplifier and an experimental study of its performance characteristics in the operating frequency band of 0.5–70 MHz were carried out. It was demonstrated that the change in bandwidth and gain occurs only when the conductivity becomes higher than $6 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. The results of an experimental study of a broadband amplifier have shown that the proposed model of accounting for the specific volume resistance of the printed circuit board material adequately describes its characteristics. The fact that even with a conductivity of $10^{-9} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, the possibility of electrostatic discharges is excluded indicates the possibility of protecting broadband amplifiers as part of radio electronic devices of spacecraft from electrification when using composite dielectrics with increased conductivity.

Keywords: computer modeling, spacecraft radio electronic devices, radiation electrization, electrostatic discharges, composite polymer dielectrics with increased conductivity

Finding: the work has been supported by the HSE Fundamental Research Program.

For citation: Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R. Modeling of a broadband amplifier made on a printed circuit board with an increased conductivity dielectric. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 635–644. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-635-644>

Введение. Электризация диэлектрических материалов [1–3] приводит к сбоям в работе и катастрофическим отказам радиоэлектронных средств, находящихся на борту космического аппарата. Существует ряд достаточно эффективных методов защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия электростатических разрядов (ЭСР) [4], когда она находится на внешней поверхности космического аппарата. Но когда электризации подвергаются диэлектрики радиоэлектроники, находящейся внутри космиче-

ского аппарата, за счет проникающего высокоэнергетического электронного излучения, защитить ее от разрядов из объема пластмассового корпуса непосредственно на полупроводниковый кристалл очень трудно [5]. В этом случае электризацию обычно называют внутренней и для защиты от нее предлагается использовать композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости. Такие композиты получают путем добавления в полимер определенного количества проводящего материала (нанотрубок, графитированной сажи, металлического порошка) [6]. Тем самым увеличивается темновая проводимость полимера, что значительно снижает максвелловское время релаксации накапливаемого заряда и, таким образом, исключается физическая возможность возникновения ЭСР. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что увеличение удельной объемной проводимости диэлектриков до значений порядка $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ исключает возможность возникновения ЭСР.

Создание условий, при которых не будут возникать электростатические разряды, – важный этап при разработке радиоэлектронной аппаратуры космического назначения. Также необходимо убедиться, что увеличение проводимости композитного диэлектрика не приводит к изменению рабочих характеристик радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Выполнены исследования возможности увеличения удельной объемной проводимости диэлектриков печатных плат изделий космической техники до $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [7]. Расчеты, проведенные с помощью компьютерной программы LT-Spice, и результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения диэлектриков повышенной проводимости в печатных платах с печатными проводниками обычных размеров.

В работе [8] в печатной плате низкочастотного мультивибратора использован композитный диэлектрик повышенной проводимости. Установлено, что его рабочие характеристики начинали изменяться только при удельной объемной проводимости диэлектрика $\gamma = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Это подтвердило возможность использования в печатных платах диэлектриков повышенной проводимостью для защиты мультивибраторов от воздействия ЭСР. Следует отметить, что мультивибратор является типичным устройством цифровой техники, достаточно помехоустойчивой, так как соответствующие устройства имеют относительно высокий уровень сигнала. Более чувствительными и критичными к помехам являются аналоговые схемы, применяющиеся, например, в навигационных системах. В качестве объекта исследования в работе [9] выбрано типовое аналоговое устройство, работающее в приемно-передающей аппаратуре космического аппарата, – гетеродин. Показано, что в диапазоне частот 9–37 МГц рабочие характеристики гетеродина меняются только тогда, когда удельная объемная проводимость начинает превышать $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

В настоящей работе методом наихудшего случая получен разброс амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) широкополосного усилителя, изготовленного на печатной плате, с композитным диэлектриком повышенной проводимостью.

Компьютерное моделирование характеристик широкополосного усилителя на печатной плате с композитным диэлектриком повышенной проводимости. Исследование проводили на примере широкополосного усилителя с полосой пропускания от 0,5 до 70 МГц, использовали схему (рис. 1) с перекрестными обратными связями [10]. Основными характеристиками широкополосного усилителя являются: АЧХ; фазочастотная характеристика; ширина полосы пропускания; коэффициент усиления в полосе пропускания. Конструктивно широкополосный усилитель выполнен в виде печатного узла (рис. 2).

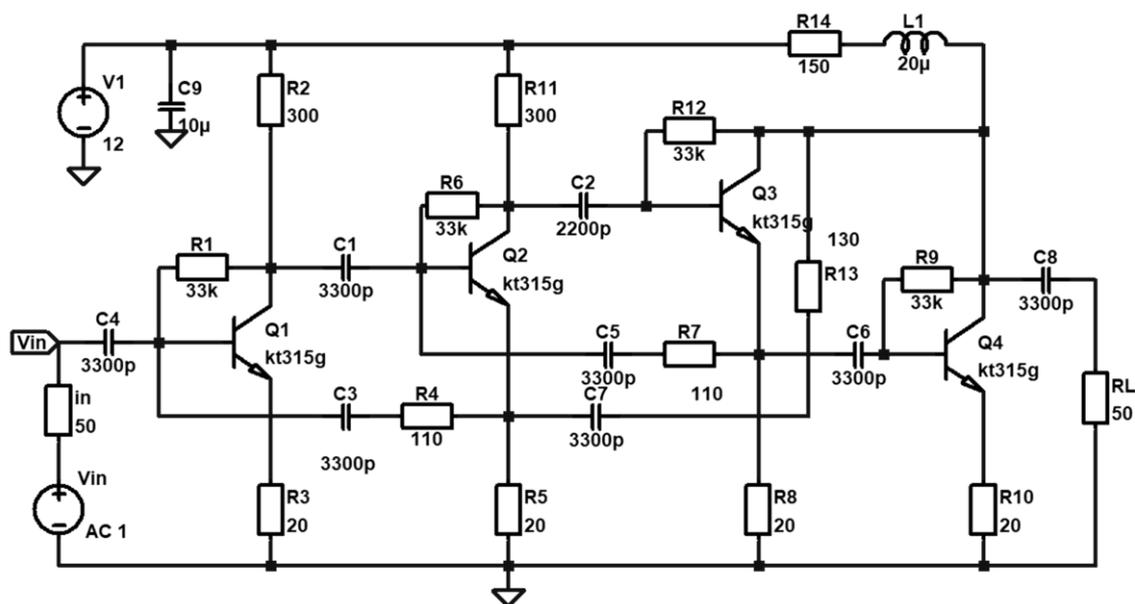


Рис. 1. Электрическая схема широкополосного усилителя
Fig. 1. Electrical diagram of a broadband amplifier

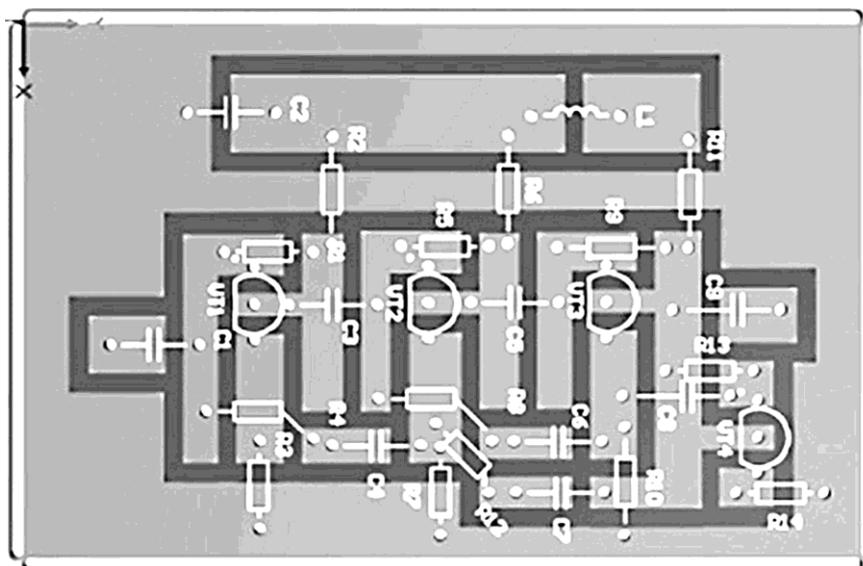


Рис. 2. Конструкция широкополосного усилителя
Fig. 2. Broadband amplifier design

Для устранения паразитных резонансов трассировка печатных проводников выполнена следующим образом: нижняя сторона печатной платы представляет собой сплошную металлизацию, которая покрывает всю ее площадь, а в верхней части двусторонней платы располагаются печатные проводники. В процессе исследования проведены компьютерное моделирование и экспериментальное определение АЧХ рассматриваемого широкополосного усилителя с композитным полимерным диэлектриком в печатном узле. Соответствующая схемотехническая модель представлена на рис. 3. Резисто-

ры, моделирующие утечку на проводник нулевого потенциала, на рис. 3 обозначены RLD. В модели принято, что все сопротивления утечек между узлами одинаковые. Это позволяет оценить удельную объемную проводимость композитного полимерного диэлектрика, при которой начинает наблюдаться изменение рабочих характеристик усилителя.

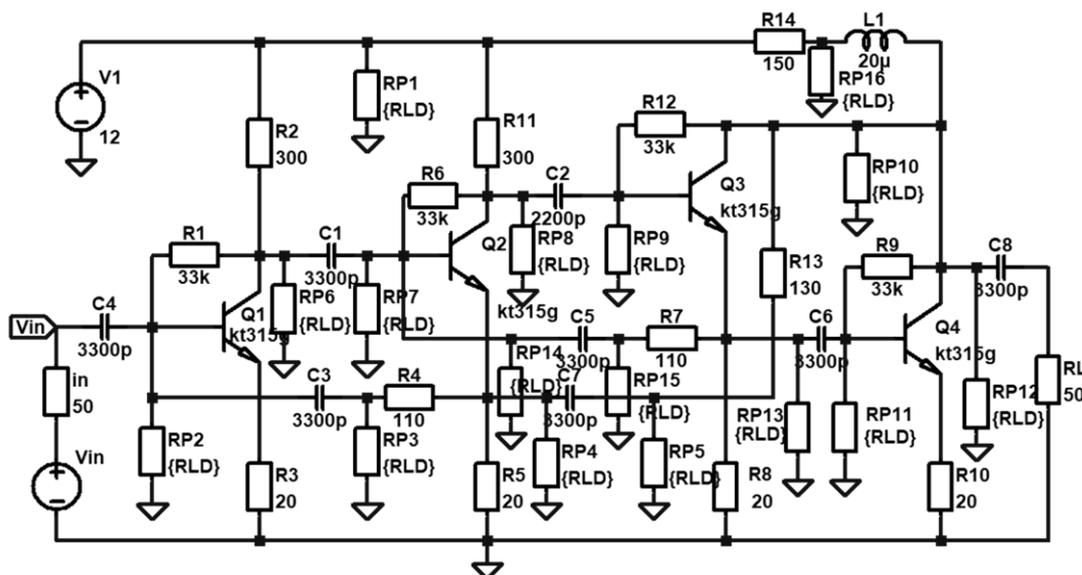


Рис. 3. Электрическая схема широкополосного усилителя с утечками на проводник нулевого потенциала (RLD – соответствующие сопротивления утечки)

Fig. 3. Electrical diagram of a broadband amplifier with leaks on a conductor of zero potential (the corresponding leakage resistances are designated as RLD)

Результаты моделирования АЧХ при изменении сопротивления каналов утечки на нулевой проводник в диапазоне 200 МОм – 4 кОм приведены на рис. 4. Установлено, что АЧХ в диапазоне утечек 200 МОм – 7 кОм практически не изменяются. Изменения АЧХ начинаются, когда сопротивление утечки становится равным 7 кОм. На рис. 5 представлены результаты расчета коэффициента усиления на частоте 20 МГц. Из графика видно, что пока сопротивление утечки превышает 7 кОм, коэффициент усиления остается неизменным и начинает резко уменьшаться, когда становится меньше этого значения.

Оценим удельную объемную проводимость диэлектрика печатной платы с полимерным композитом, который создает сопротивление утечки между выбранными узлами схемы и нулевым потенциалом R_m , равное 7 кОм. При трассировке печатных проводников, которая показана на рис. 2, утечки тока при использовании композитного диэлектрика с повышенной проводимостью будут иметь место между проводником на верхней стороне печатной платы и нижней заземленной плоскостью металлизации. Если задать прямоугольную форму печатного проводника, то соответствующая паразитная емкость, рассчитанная в соответствии с [11, 12], будет составлять 8,4 пФ. Тогда с учетом минимального сопротивления утечки $R_m = 7 \cdot 10^3$ Ом, при котором начинают меняться характеристики широкополосного усилителя и $C_m = 8,4$ пФ, удельную объемную проводимость полимерного диэлектрика можно найти по формуле

$$\gamma_m = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{R_m C_m} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,5}{7 \cdot 10^3 \cdot 8,4 \cdot 10^{-12}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}.$$

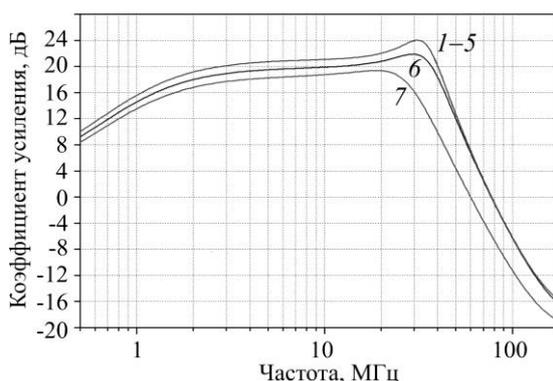


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики широкополосного усилителя с сопротивлением утечки на нулевой потенциал: 1 – 200 МОм; 2 – 100 МОм; 3 – 50 МОм; 4 – 20 МОм; 5 – 10 МОм; 6 – 7 кОм; 7 – 4 кОм
 Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of a broadband amplifier with leakage resistance at zero potential: 1 – 200 MΩ; 2 – 100 MΩ; 3 – 50 MΩ; 4 – 20 MΩ; 5 – 10 MΩ; 6 – 7 kΩ; 7 – 4 kΩ

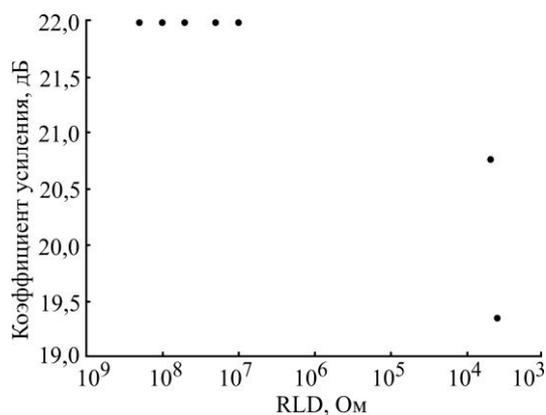


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от сопротивления утечки между узлами схемы и нулевым проводником на частоте 20 МГц
 Fig. 5. The dependence of the gain on the leakage resistance between the circuit nodes and the zero conductor at a frequency of 20 MHz

Основные рабочие характеристики исследуемого усилителя – полоса пропускания и коэффициент усиления – начинают изменяться, когда удельная объемная проводимость становится больше $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. В то же время в условиях космоса отсутствие электростатических разрядов наблюдается при проводимости диэлектрика $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Таким образом, использование печатной платы с диэлектриками повышенной удельной проводимости порядка $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ гарантированно обеспечивает неизменность рабочих характеристик широкополосного усилителя и исключает возможность возникновения ЭСР.

Экспериментальная проверка характеристик широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости. Для экспериментального подтверждения результатов моделирования исследуемого усилителя проведено его макетирование. На рис. 6 приведена печатная плата усилителя из фольгированного стеклотекстолита размером $70 \times 45 \text{ мм}$ и толщиной 3 мм. На одной стороне печатной

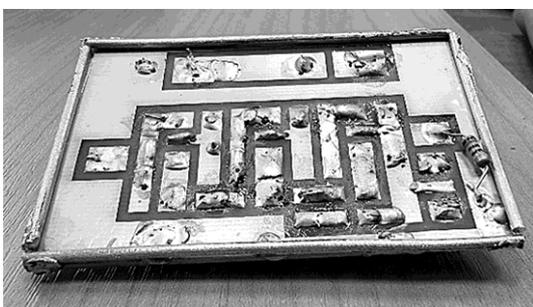


Рис. 6. Печатная плата широкополосного усилителя
 Fig. 6. Wideband amplifier circuit board

платы сделаны широкие проводящие дорожки, другая сторона полностью металлизирована, за исключением небольших областей вокруг отверстий, через которые проходят выводы активных и пассивных элементов.

Макетирование проводили следующим образом:

1. По периметру со стороны печатных проводников припаивали медную проволоку, имеющую диаметр, равный толщине подложки.

2. Печатную плату помещали в печь и нагревали до температуры $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Одновременно готовили композитный полимерный материал путем добавления определенного процента сажи и равномерного его распределения с использованием магнитной мешалки. Удельная объемная проводимость полученного композитного полимерного материала составляла $6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и в соответствии с разработанным критерием обеспечивала отсутствие ЭСР.

4. На нагретую печатную плату наносили слой композита с повышенной проводимостью, затем печатную плату помещали в ультразвуковую ванну с частотой 38 кГц, чтобы предотвратить агрегирование сажи в макродиполи и устранить эффект резкого увеличения диэлектрической постоянной композита. После остывания конструкции обеспечивался электрический контакт между пластинкой и бортиком медной проволоки.

Изготовленную печатную плату подключали к источнику питания, на вход схемы от генератора АКПП-3417 подавали синусоидальное напряжение с амплитудой 0,2 В и частотами 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 70 МГц. Информацию снимали с двухлучевого цифрового осциллографа Tektronix 3012В, подключенного к выходу усилителя.

Сравнение результатов, полученных путем моделирования АЧХ широкополосного усилителя с использованием печатной платы на композите с повышенной проводимостью, с результатами экспериментального измерения коэффициентов усиления макета широкополосного усилителя на частотах 1, 2, 5, 10 и 20 МГц представлено на рис. 7. На рисунке приведен результат моделирования наихудшего случая АЧХ при сопротивлении утечки, составляющей 600 МОм, что соответствует удельной объемной проводимости композита $6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Как видно из рисунка, экспериментальные значения коэффициента усиления лежат практически в середине диапазона, полученного методом наихудшего случая с учетом $\pm 10\%$ разброса номиналов элементов широкополосного усилителя.

Таким образом, рабочие характеристики широкополосного усилителя, полученные в результате моделирования, и характеристики его экспериментально изготовленного макета хорошо согласуются.

Заключение. Разработанная модель широкополосного усилителя отличается от традиционной введением в схему дополнительных сопротивлений, характеризующих токовые утечки между узлами устройства и нулевым проводником. Токовые утечки вызваны уменьшением удельного объемного сопротивления печатной платы из-за замены обычного полимерного диэлектрика на композитный полимерный диэлектрик с повышенной проводимостью для исключения ЭСР.

Компьютерное моделирование рабочих характеристик широкополосного усилителя в полосе частот 0,5–70 МГц, печатная плата которого содержит композитный диэлектрик повышенной проводимости, позволило установить, что их изменение начинается только после того, как удельная объемная проводимость материала печатной платы

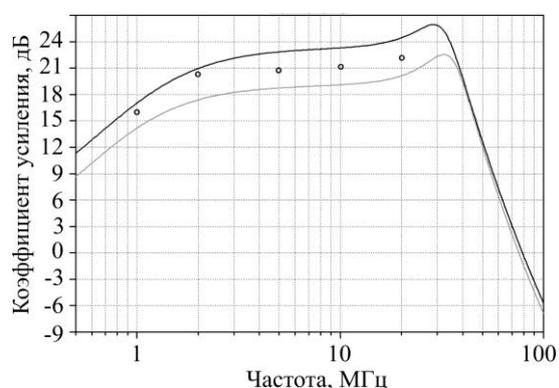


Рис. 7. Результаты расчета наихудшего случая АЧХ широкополосного усилителя, при сопротивлении утечки 600 МОм (сплошные линии) и экспериментальные значения коэффициента усиления на частотах 1, 2, 5, 10 и 20 МГц (○)
 Fig. 7. Calculation results of the worst case frequency response of a broadband amplifier with a leakage resistance of 600 MΩ (solid lines) and experimental values at frequencies of 1, 2, 5, 10 and 20 MHz (○)

достигнет $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Исследование рабочих характеристик экспериментально созданного макета такого усилителя подтвердило адекватность предложенной модели.

Композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости могут успешно использоваться в широкополосных усилителях радиоэлектронных устройств космического применения, защищая их от поражающего действия внутренней электризации.

Литература

1. **Frederickson A. R.** Electric discharge pulses in irradiated solid dielectrics in space // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1983. Vol. EI-18. Iss. 3. P. 337–349. <https://doi.org/10.1109/TEI.1983.298623>
2. **Акишин А. И.** Электроразрядные сбои в космических аппаратах в зоне космических излучений // Перспективные материалы. 2010. № 2. С. 27–32.
3. **Catani J.-P., Payan D.** Electrostatic behavior of materials in a charging space environment // Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. Noordwijk: ESA Publ. Division, 2003. P. 3–16.
4. **Purvis C. K., Garrett H. B., Whittlesey A. C., Stevens N. J.** Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects: Technical paper 2361. Cleveland, OH: NASA, 1984. 47 p.
5. **Белик Г. А., Абрамешин А. Е., Саенко В. С.** Внутренняя электризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 3 (42). С. 5–16.
6. Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации / **Е. Д. Пожидаев, В. С. Саенко, И. А. Смирнов и др.** // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 32–35.
7. **Saenko V., Tyutnev A., Abrameshin A., Belik G.** Computer simulations and experimental verification of the nanoconductivity concept for the spacecraft electronics // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45. Iss. 8. P. 1843–1846. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2688180>
8. **Абрамешин А. Е., Белик Г. А., Саенко В. С.** Исключение внутренней электризации бортовой аппаратуры космических аппаратов путем применения нанопроводящих диэлектриков // Труды XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 9–14 июля 2012 г.) / под общ. ред. Г. Г. Бондаренко. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2012. С. 544–550.
9. **Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R.** Computer simulations and experimental investigation of the heterodyne employing printed circuit board with an increased resistance to electrostatic discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47. Iss. 8. P. 3653–3657. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2915522>
10. **Streetman B. G., Banerjee S.** Solid state electronic devices. Hoboken, NJ: Prentice Hall, 2000. 558 p.
11. **Кечиев Л. Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ИДТ, 2007. 615 с.
12. **Кечиев Л. Н.** Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат: инженерное пособие. М.: Грифон, 2021. 416 с.

Статья поступила в редакцию 04.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Абрамешин Дмитрий Андреевич – аспирант департамента электронной инженерии, ведущий инженер учебно-исследовательской лаборатории функциональной безопасности космических аппаратов и систем Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), Dabrameshin@hse.ru

Пожидаев Евгений Дмитриевич – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), EPozhidaev@hse.ru

Саенко Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), VSaenko@hse.ru

Тумковский Сергей Ростиславович – доктор технических наук, доцент департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), STumkovskiy@hse.ru

References

1. Frederickson A. R. Electric discharge pulses in irradiated solid dielectrics in space. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1983, vol. EI-18, iss. 3, pp. 337–349. <https://doi.org/10.1109/TEI.1983.298623>
2. Akishin A. I. Charging anomalies in spacecrafts under space radiation. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 2, pp. 27–32. (In Russian).
3. Catani J.-P., Payan D. Electrostatic behavior of materials in a charging space environment. *Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment*. Noordwijk, ESA Publ. Division, 2003, pp. 3–16.
4. Purvis C. K., Garrett H. B., Whittlesey A. C., Stevens N. J. *Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects*, technical paper 2361. Cleveland, OH, NASA, 1984. 47 p.
5. Belik G. A., Abrameshin A. E., Saenko V. S. Internal charging of space vehicles' airborne electronic equipment. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti*, 2012, no. 3 (42), pp. 5–16. (In Russian).
6. Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Smirnov I. A., Babkin G. V., Tyutnev A. P., Floridov A. A., Doronin A. N. Enhancement of spacecraft resistance to effects of electrification affects. *Kosmonavtika i raketostroyeniye = Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2003, no. 1 (30), pp. 32–35. (In Russian).
7. Saenko V., Tyutnev A., Abrameshin A., Belik G. Computer simulations and experimental verification of the nanoconductivity concept for the spacecraft electronics. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, iss. 8, pp. 1843–1846. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2688180>
8. Abrameshin A. E., Belik G. A., Saenko V. S. Space equipment internal charging elimination by the use of nanoconducting dielectrics. *Trudy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii "Radiatsionnaya fizika tverdogo tela" (Sevastopol', 9–14 iyulya 2012 g.)*. Moscow, FSBSI RIAMT Publ., 2012, pp. 544–550. (In Russian).
9. Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R. Computer simulations and experimental investigation of the heterodyne employing printed circuit board with an increased resistance to electrostatic discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, iss. 8, pp. 3653–3657. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2915522>
10. Streetman B. G., Banerjee S. *Solid state electronic devices*. Hoboken, NJ, Prentice Hall, 2000. 558 p.
11. Kechiev L. N. *Printed circuit board design for high-speed digital equipment*. Moscow, IDT Publ., 2007. 615 p. (In Russian).
12. Kechiev L. N. *Practical book of multilayer printed circuit board designing*, engineer guide. Moscow, Grifon Publ., 2021. 416 p. (In Russian).

The article was submitted 04.05.2022; approved after reviewing 05.06.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Dmitry A. Abrameshin – PhD student of the Electronic Engineering Department, Leading Engineer of the Educational and Research Laboratory of Functional Safety of Spacecraft and Systems, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), Dabrameshin@hse.ru

Evgeny D. Pozhidaev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), EPozhidaev@hse.ru

Vladimir S. Saenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), VSaenko@hse.ru

Sergey R. Tumkovskiy – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), STumkovskiy@hse.ru



Издательско-полиграфический комплекс
Национального исследовательского университета «МИЭТ»
информирует



Вышло в свет учебное пособие

**Беляев А.А., Янакова Е.С., Липатов И.А., Скрипниченко М.Н., Рябошук Н.М.,
Евтушок О.С. Высокоуровневые языки проектирования и верификации
интегральных микросхем: язык Python: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2022. 112 с.: ил.**



Изложены основы языка программирования Python, который широко применяется в маршруте проектирования интегральных микросхем (ИМС). Рассмотрены методы и возможности использования языка Python как эффективного средства автоматизации на различных этапах проектирования ИМС. Приведены варианты лабораторных работ, выполнение которых способствует формированию у обучающихся навыков программирования на языке Python при решении задач проектирования ИМС.

Для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.04 - «Электроника и наноэлектроника» и 09.04.01 - «Информатика и вычислительная техника».

ISBN 978-5-7256-0986-8