

Применение радиопоглощающих материалов для ослабления высокочастотных помех в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов

КИРИЛЛОВ В.Ю.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

ЖУКОВ П.А.

МОКБ «МАРС», Москва, Россия

ТОРЛУПА А.А.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

Высокочастотные кондуктивные электромагнитные помехи наводятся в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов под воздействием внешних техногенных электромагнитных полей, проникающих в конструкцию через радиопрозрачные части корпуса. Для ослабления воздействия наведенных в двухпроводных линиях электрических жгутов и электрических цепях электротехнических комплексов высокочастотных кондуктивных помех на чувствительные полупроводниковые элементы и интегральные микросхемы бортовых приборов и устройств используются фильтры низкой частоты на сосредоточенных элементах. На высоких частотах в электрических цепях фильтров могут возникать резонансные явления, которые ухудшают возможности фильтров ослаблять кондуктивные помехи. Ослабление высокочастотных кондуктивных помех и устранение путей их распространения в двухпроводных линиях электрических жгутов и электрических цепях бортовых приборов и устройств электротехнических комплексов может быть достигнуто путем применения радиопоглощающих материалов. Кондуктивные электромагнитные помехи в двухпроводных линиях на частоте более 1000 МГц создают высокочастотные электромагнитные поля. Размещение радиопоглощающих материалов в непосредственной близости от проводников двухпроводных линий позволяет ослабить высокочастотные кондуктивные помехи путем поглощения энергии создаваемых ими электромагнитных полей. Приведенные результаты экспериментальных исследований позволяют оценить эффективность ослабления высокочастотных кондуктивных помех на частотном диапазоне 0,1–3000 МГц путем использования радиопоглощающих материалов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиопоглощающие материалы, высокочастотные помехи, электротехнические комплексы, летательные аппараты

Радиопоглощающие материалы (РПМ) широко применяются в технике высоких частот для оборудования безэховых камер или для покрытия внешних и внутренних поверхностей электронных технических средств различного назначения. Применение РПМ позволяет уменьшить уровни результирующих электромагнитных полей, создаваемых наложением эмиссионных полей и полей, отраженных от стен испытательных лабораторий, корпусов испытуемых технических средств и средств измерения [1].

Другие применения РПМ не так широко распространены, но известно, что проводятся исследования для их применения в научных целях [2–7]. Применение РПМ позволяет уменьшать излучаемую помехоэмиссию, ослаблять резонансные явления, усиливать

эффективность экранирования при условии размещения образцов радиопоглощающих материалов во внутреннем пространстве корпуса приборов и устройств, приборных модулей и конструкционных блоков [8, 9].

Радиопоглощающие материалы могут применяться не только для увеличения эффективности экранирования, но и для увеличения эффективности ослабления высокочастотных кондуктивных электромагнитных помех.

При условии размещения РПМ в плотном контакте с диэлектрическими покрытиями проводников двухпроводных линий они могут поглощать энергию электромагнитных полей, создаваемых высокочастотными кондуктивными помехами в двухпроводных линиях электрических жгутов или в электрических цепях

приборов и устройств электротехнических комплексов летательных аппаратов.

Постановка задачи. В процессе полета летательный аппарат может подвергаться воздействию техногенных высокочастотных электромагнитных полей. Проникая во внутреннее пространство конструкции летательного аппарата, электромагнитные поля воздействуют на наиболее восприимчивые электрические жгуты бортовой сети, электрические цепи бортовых приборов и устройств электротехнического комплекса. Под воздействием проникающих через радиопрозрачные части корпуса летательного аппарата электромагнитных полей от внешних источников в двухпроводных линиях электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов могут наводиться и распространяться высокочастотные кондуктивные электромагнитные помехи [10–12]. Емкостные и индуктивные связи вызывают высокочастотные перекрестные помехи, которые распространяются в разветвленных электрических цепях и линиях многослойных печатных плат приборов и устройств электротехнического комплекса летательного аппарата [13–17].

Применение электрических фильтров с сосредоточенными параметрами не позволяет эффективно подавлять помехи на высоких частотах, так как в электрических цепях таких фильтров могут возникать резонансные явления [18]. Размещение радиопоглощающих материалов во внутреннем пространстве корпуса бортовых приборов и устройств, приборных модулей и конструкционных отсеков, а также в близком контакте с проводниками двухпроводных линий электрических жгутов позволяет уменьшать уровень высокочастотных помех путем поглощения энергии электромагнитных полей, создаваемых высокочастотными кондуктивными помехами. Проведение исследований, позволяющих определить эффективность ослабления высокочастотных кондуктивных помех дает возможность оценивать перспективы применения радиопоглощающих материалов для борьбы с наведенными помехами в двухпроводных линиях жгутов и электрических цепях приборов и устройств бортовых электротехнических комплексов летательных аппаратов.

Метод исследования. Для исследования эффективности ослабления высокочастотных кондуктивных помех РПМ была применена установка для имитации кондуктивных помех в частотном диапазоне 0,1–3000 МГц, схема которой приведена на рис. 1. На схеме неэкранированная двухпроводная линия подключена к высокочастотному «tracking»-генератору, входящему в состав измерительного приемника HMS-X. Выходная мощность «tracking»-генератора устанавливалась 0 дБм (1 мВт), что соответствует выходному напряжению 107 дБмкВ. Измерение напряжения имитируемых кондуктивных помех, создаваемых генератором, проводилось на другом конце двухпроводной линии синхронизированным с генератором измерительным приемником, работающим в режиме спектроанализатора в заданном частотном диапазоне.

Для проведения исследований эффективности подавления высокочастотных кондуктивных помех использовался радиопоглощающий материал ТПМВ-1С (рис. 2), выполненный на основе минеральных волокон с наполнителем из углеродных частиц. Композиционный материал, из которого изготавливается РПМ, легко поддается механической обработке. Габаритные размеры образцов РПМ в процессе их изготовления могут принимать различные значения от десятков до сотен мм в соответствии с требованиями технических условий на их применение.

Относительная диэлектрическая проницаемость данного РПМ зависит от частоты и изменяется в диапазоне 1–37 ГГц от 4 до 1. Удельная плотность материала составляет 150 кг/м³, удельная электропроводность – 2500 См/м. Данный материал является термостойким, сохраняет свои свойства в температурном диапазоне (–150...+150) °С и может применяться для улучшения электромагнитной обстановки в бортовых комплексах летательных атмосферных и космических аппаратов различного назначения [19].

Предварительные исследования данного РПМ показали, что размещение во внутреннем пространстве макета корпуса приборного модуля летательного аппарата образцов данного материала позволяет существенно ослабить излучаемую помехоэмиссию и

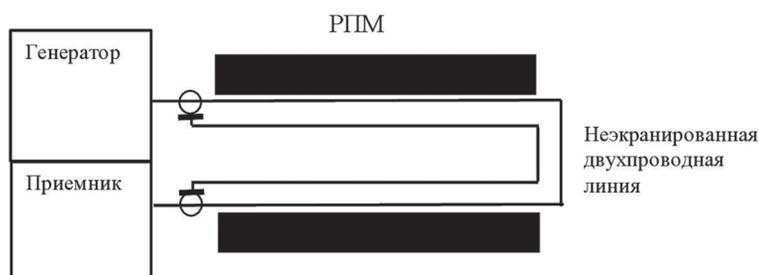


Рис. 1. Схема установки для исследования эффективности ослабления высокочастотных кондуктивных помех в двухпроводной линии с помощью РПМ

Fig. 1. Scheme of the installation for studying the effectiveness of attenuation of high-frequency conducted interferences in a two-wire line using RAM



Рис. 2. Образец радиопоглощающего материала ТПМВ-1С

Fig. 2. Sample of radar absorbing material TPMV-1S

уменьшить резонансные явления за счет поглощения энергии электромагнитного поля [8, 9].

Цель исследования заключалась в том, чтобы выяснить возможности применения РПМ для ослабления высокочастотных кондуктивных помех в проводниках двухпроводных линий. Медные проводники двухпроводной линии диаметром 0,5 мм с внешним изолирующим покрытием и длиной 1 м размещаются на установке между образцами радиопоглощающего материала (рис. 1). Образцы РПМ размерами 300×200×30 мм закрывают проводники двухпроводной линии и плотно

прилегают к ним. Выходное высокочастотное напряжение «tracking»-генератора $U = 107$ дБмкВ, имитирующего кондуктивную помеху, поддерживается постоянным на всем частотном диапазоне 0,1–3000 МГц. Измерение напряжения кондуктивной помехи проводилось приемником HMS-X первоначально на двухпроводной линии, не закрытой образцами РПМ, затем на этой же двухпроводной линии, но закрытой образцами РПМ, т.е. размещенной между двумя образцами, как схематично показано на рис. 1.

Результаты. На рис. 3 приведены частотные диаграммы напряжения имитируемой генератором кондуктивной помехи в диапазоне 0,1–3000 МГц.

Частотная диаграмма 1 соответствует напряжению имитируемой кондуктивной помехи на входе измерительного приемника двухпроводной линии, не закрытой РПМ. Частотная диаграмма 2 представляет изменение напряжения имитируемой кондуктивной помехи при условии, что двухпроводная линия закрыта РПМ.

Из сравнения диаграмм (рис. 3) следует, что с увеличением частоты происходит уменьшение напряжения кондуктивной помехи в двухпроводной линии, закрытой РПМ. Частотная диаграмма 1 имеет ярко выраженный многорезонансный характер. У диаграммы 2 резонансные пики напряжения на частотах более 1000 МГц имеют меньшие значения, более сглаженную форму и, соответственно, меньшую разницу между максимальными и минимальными значениями. С ростом частоты возрастает эффективность ослабления кондуктивной помехи, равная разности между значениями напряже-

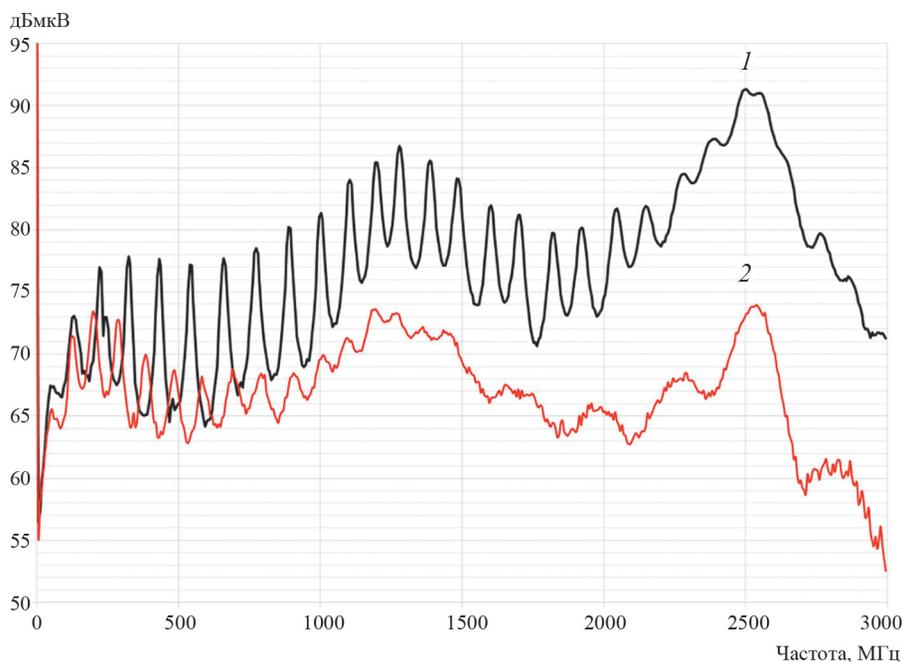


Рис. 3. Частотные диаграммы напряжения высокочастотной имитируемой кондуктивной помехи в двухпроводной линии: 1 – частотная диаграмма напряжения помехи, не закрытой РПМ; 2 – частотная диаграмма напряжения помехи двухпроводной линии, закрытой РПМ

Fig. 3. Voltage frequency diagrams of high-frequency simulated conducted interference in a two-wire line: 1 – frequency diagram of the interference voltage without the use of RAM; 2 – frequency diagram of the interference voltage of a two-wire line that is closed RAM

ния кондуктивной помехи открытой двухпроводной линии и закрытой образцами РПМ. Для дискретных значений частот 1000, 2500 и 3000 МГц эффективность ослабления кондуктивной помехи возрастает и составляет соответственно 11,7, 18,1 и 18,7 дБ.

Выводы. Увеличение эффективности ослабления кондуктивной помехи в двухпроводной линии, закрытой РПМ, подтверждает возможность применения РПМ в качестве технического средства, предназначенного для ослабления наведенных высокочастотных кондуктивных помех в жгутах и электрических цепях бортовых приборов и устройств электротехнических комплексов летательных аппаратов. Применение РПМ приводит к значительному сглаживанию частотной диаграммы напряжения кондуктивной помехи двухпроводной линии. Колебания частотной диаграммы напряжения кондуктивной помехи уменьшаются и на частоте свыше 1000 МГц. Из сравнения экспериментальных частотных диаграмм следует, что на частотах более 1000 МГц эффективность ослабления кондуктивной помехи двухпроводной линии, закрытой РПМ, превышает 10 дБ и возрастает при дальнейшем увеличении частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кечиев Л.Н.** Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2019, 722 с.
2. **Ковалева Т.Ю. и др.** Радиопоглощающие материалы для покрытия электронных средств спецтехники. – 27 междунар. конф. “Электромагнитное поле и материалы. Фундаментальные физические исследования”, 2015, с. 431–436.
3. **Tamminen A., et al.** Transmittance and Monostatic Reflectivity of Radar Absorbing Materials for CATR. – The 2nd European Conf. on Antennas and Propagation, 2007, DOI:10.1049/ic.2007.1561.
4. **Gevorkyan A.V., Privalova T. Yu.** The Radiation Characteristics of 3.43: 1 Bandwidth Dipole Antenna with Radar Absorbing Material. – IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, 2018, DOI:10.23919/RADIO.2018.8572346.
5. **Anyutin N.V., Titarenko A.V., Elizarov S.V.** Justification of the Conditions of Reproducible Measured Characteristics of Radio Absorbing Materials in Free Space. – Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves 2017, DOI:10.1109/RSEMW.2017.8103597.
6. **Zhang Ch., et al.** Application of radar absorbing material in design of metal space frame radomes. – Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf., 2011, DOI:10.1109/CSQRWC.2011.6036926.
7. **Budai A.G., et al.** Influence of Gratings Made from Conducting Wire Elements on Electromagnetic Properties of Radio Absorbing Coating. – 20th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication", 2010, DOI:10.1109/CRMICO.2010.5632971.
8. **Zhukov P.A., Kirillov V.Yu.** The Use of Radio Absorbing Materials for Electronic Devices. – 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2020, DOI:10.1109/REEPE49198.2020.9059210.
9. **Zhukov P.A., Kirillov V.Yu.** The Application of Radio Absorbing Material to Reduce Interference Emissions from Instruments and Devices of Spacecraft Electrical System. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 18th International

Conference AviaSpace-2019, 2020, vol. 868, DOI:10.1088/1757-899X/868/1/012009.

10. **Гетманец А.Н. и др.** Передача наведенных электромагнитными полями токов и напряжений по цепям связи. – Технологии электромагнитной совместимости, 2020, № 3 (74), с. 3–24.
11. **Ott H.W.** Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 872 p.
12. **Гизатуллин З.М., Чермошенцев С.Ф.** Моделирование электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при внешнем гармоническом электромагнитном воздействии. – Информационные технологии, 2010, № 6, с. 2–7.
13. **Noise, Cross-talk, Jitter, Skew and EMI.** Section 6. Backplane Designer's guide. Fairchild Semiconductor Corporation MS500736, 2002, 11 p.
14. **Hill D. Cavcey K. Johnk R.** Cross-Talk Between Microstrip Transmission Lines. – IEEE Transactions on EMC, 1994, vol. 36, No. 4, pp. 314–321, DOI:10.1109/15.328861.
15. **Brooks D.** Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board design. Prentice Hall PTR, 2003, 432 p.
16. **Нгуен Ван Тай., Кириллов В.Ю.** Перекрестные помехи в электрических соединителях. – Электричество, 2021, № 3, с. 54–59.
17. **Кечиев Л.Н.** Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017, 423 с.
18. **Барнс Дж.** Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990, 238 с.
19. **Кириллов В.Ю. и др.** Термостойкий радиопоглощающий материал для уменьшения помехоэмиссии и ослабления резонансных явлений бортовых приборов и устройств космических аппаратов. – Известия РАН. Серия физическая, 2021, т. 85, № 11, с. 1573–1576.

[18.01.2022]



Авторы: Кириллов Владимир Юрьевич – доктор техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия.



Жуков Пётр Александрович – научный сотрудник МОКБ «МАРС» филиала Всероссийского научно-исследовательского института Автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия.



Торлупа Андрей Александрович – аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия.

Application of Radar-Absorbing Materials for Attenuating High-Frequency Interference in the Electrical Circuits of Aircraft Electrical Systems

KIRILLOV Vladimir Yu. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) – Head of the Theoretical Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.).

ZHUKOV Petr A. (MOKB "MARS" branch of VNIIA them. N.L. Dukhova, Moscow, Russia) – Research Associate of the Electromagnetic Compatibility Dept.

TORLUPA Andrey A. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) – Postgraduate Student of the Theoretical Electrical Engineering Dept.

Conducted high-frequency electromagnetic interference is induced in the electrical circuits of aircraft electrical systems under the effect of external man-induced electromagnetic fields penetrating into the aircraft structure through radio-transparent apertures. To attenuate the impact of the conducted high-frequency electromagnetic interference induced in the two-wire lines of electrical bundles and other electrical circuits of electrical systems on sensitive semiconductor elements and integral microchips of on-board instruments and devices, low-pass filters on the basis of lumped components are used. At high frequencies, resonance phenomena may occur in the filter electrical circuits, which degrade the filter capabilities to attenuate conducted interference. Conducted high-frequency interference can be attenuated, and their propagation paths in the two-wire lines of electrical bundles and in the electrical circuits of on-board instruments and electrical system devices can be eliminated by applying radar-absorbing materials (RAM). Conducted electromagnetic interference in two-wire lines at a frequency above 1000 MHz generates high-frequency electromagnetic fields. With RAM placed in close proximity to the conductors of two-wire lines, it is possible to attenuate conducted high-frequency interference due to absorption of the interference electromagnetic field energy. The results of experimental studies are presented, the data of which make it possible to evaluate the extent to which the conducted high-frequency interference is attenuated in the frequency band 0.1–3000 MHz by applying radar-absorbing materials.

Key words: radar-absorbing materials, high-frequency interference, electrical systems, aircraft

REFERENCES

1. **Kechev L.N.** *Ekranirovanie radioelektronnoy apparatury. Inzhenernoe posobie* (Shielding of Electronic Equipment. Engineering Manual). M.: Grifon, 2019, 722 p.
2. **Kovaleva T.Yu., et al.** 27 mezhdunar. konf. "Elektromagnitnoe pole i materialy. Fundamental'nye fizicheskie issledovaniya" (27 International Conf. "Electromagnetic Field and Materials. Fundamental Physical Research"), 2015, pp. 431–436.
3. **Tamminen A., et al.** Transmittance and Monostatic Reflectivity of Radar Absorbing Materials for CATR. – The 2nd European Conf. on Antennas and Propagation, 2007, DOI:10.1049/ic.2007.1561.
4. **Gevorkyan A.V., Privalova T.Yu.** The Radiation Characteristics of 3.43: 1 Bandwidth Dipole Antenna with Radar Absorbing Material. – IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, 2018, DOI:10.23919/RADIO.2018.8572346.
5. **Anyutin N.V., Titarenko A.V., Elizarov S.V.** Justification of the Conditions of Reproducible Measured Characteristics of Radio Absorbing Materials in Free Space. – Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves 2017, DOI:10.1109/RSEMW.2017.8103597.
6. **Zhang Ch., et al.** Application of radar absorbing material in design of metal space frame radomes. – Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf., 2011, DOI:10.1109/CSQRWC.2011.6036926.
7. **Budai A.G., et al.** Influence of Gratings Made from Conducting Wire Elements on Electromagnetic Properties of Radio Absorbing Coating. – 20th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication", 2010, DOI:10.1109/CRMICO.2010.5632971.
8. **Zhukov P.A., Kirillov V.Yu.** The Use of Radio Absorbing Materials for Electronic Devices. – 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2020, DOI:10.1109/REEPE49198.2020.9059210.
9. **Zhukov P.A., Kirillov V.Yu.** The Application of Radio Absorbing Material to Reduce Interference Emissions from Instruments and Devices of Spacecraft Electrical System. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 18th International Conference AviaSpace-2019, 2020, vol. 868, DOI:10.1088/1757-899X/868/1/012009.
10. **Getmanets A.N., et al.** *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestnosti – in Russ. (Electromagnetic Compatibility Technologies)*, 2020, No. 3 (74), pp. 3–24.
11. **Ott H.W.** *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 872 p.
12. **Gizatullin Z.M., Chermoshentsev S.F.** *Informatsionnye tekhnologii – in Russ. (Information Technologies)*, 2010, No. 6, pp. 2–7.
13. **Noise**, Cross-talk, Jitter, Skew and EMI. Section 6. Backplane Designer's guide. Fairchild Semiconductor Corporation MS500736, 2002, 11 p.

14. **Hill D. Cavcey K. Johnk R.** Cross-Talk Between Microstrip Transmission Lines. – IEEE Transactions on EMC, 1994, vol. 36, No. 4, pp. 314–321, DOI:10.1109/15.328861.

15. **Brooks D.** Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board design. Prentice Hall PTR, 2003, 432 p.

16. **Nguen Van Tay., Kirillov V.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 3, pp. 54–59.

17. **Kechiev L.N.** *Pechatnye platy i uzly gigabitnoy elektroniki (Printed Circuit Boards and Nodes of Gigabit Electronics)*. M.: Grifon, 2017, 423 p.

18. **Barns J.** *Elektronnoe konstruirovaniye: Metody bor'by s pomekhami (Electronic Design: Antiinterference Methods)*. M.: Mir, 1990, 238 p.

19. **Kirillov V.Yu., et al.** *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Physical Series)*, 2021, vol. 85, No. 11, pp. 1573–1576.

[18.01.2022]