

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

КИРИЛЛОВ В.Ю., ТОРЛУПА А.А., ТОМИЛИН М.М.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

Высокочастотные электромагнитные помехи наводятся в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов под воздействием внешних электромагнитных полей, проникающих в конструкцию летательных аппаратов через радиопрозрачные части корпуса. Распространение высокочастотных помех в электрических цепях электротехнических комплексов происходит из-за перекрёстных ёмкостных и индуктивных связей, а также вследствие излучения электромагнитного поля проводниками линий связи электрических жгутов. Для ослабления перекрёстных связей и, соответственно, для уменьшения уровней перекрестных помех применяют экранирование линий связи электрических жгутов плетёными или сплошными экранами. Ославление перекрёстных помех и устранение путей их распространения в линиях связи электрических жгутов и в электрических цепях бортовых приборов и устройств электротехнических комплексов может быть достигнуто, помимо экранирования, путём применения радиопоглощающих материалов. Размещение радиопоглощающих материалов в непосредственной близости от проводников линий связи позволяет ослаблять перекрестные помехи путем поглощения энергии создаваемых ими электромагнитных полей. Приведенные результаты экспериментальных исследований позволяют оценить эффективность ослабления перекрестных помех на частотном диапазоне 10...3000 МГц путем использования радиопоглощающего материала. Применение радиопоглощающего материала позволяет достигнуть уменьшения напряжения перекрестной помехи между линиями связи электрического жгута на 20...30 дБмкВ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: летательный аппарат, перекрестная помеха, радиопоглощающий материал, электротехнический комплекс

Перекрёстные помехи в бортовых электротехнических комплексах возникают из-за ёмкостных и индуктивных связей между электрическими жгутами, бортовыми приборами, контактами электрических соединителей [1–5]. На высоких частотах перекрёстные помехи возникают в результате излучения проводниками линий связи и электропроводными дорожками печатных плат электромагнитного поля. Проводники линий связи с высокочастотными токами являются антеннами, излучающими высокочастотное электромагнитное поле, а проводники низкочастотных линий связи в электрических жгутах – приёмными антеннами [6–9]. Высокочастотные токи помех в линиях связи электрических жгутов возникают в результате воздействия на жгуты внешних электромагнитных полей, проникающих через радиопрозрачные участки корпуса летательного аппарата. Ёмкостные и индуктивные связи, высокочастотное излучение линий связи в электрических жгутах приводят к распространению перекрёстных электромагнитных помех в бортовой кабельной сети. Перекрёстные помехи влияют на работу бортовых приборов, изменяют параметры электротех-

нических комплексов, вызывают отклонения параметров от номинальных значений.

Во внутреннем пространстве бортовых приборных модулей электротехнических комплексов летательных аппаратов уровень перекрёстных помех может значительно превышать уровни перекрестных помех в открытом пространстве стенда, на котором проводятся предварительные испытания [10]. Известным способом уменьшения уровня перекрестных помех являются экранирование линий связи, из которых состоит электрический жгут, и экранирование всего жгута [11]. Экранирование линий связи электрических жгутов, как и экранирование жгутов целиком, не всегда оправдано, так как приводит к увеличению массогабаритных показателей. Наряду с известными методами ослабления перекрёстных помех может быть достигнуто применением радиопоглощающих материалов (РПМ). Радиопоглощающие материалы применяются для поглощения энергии электромагнитных волн при испытаниях на электромагнитную совместимость и проведении исследований в научных целях [12–18]. Применение РПМ позволяет уменьшать помехоэмиссию и ослаблять ре-

зональные явления бортовых приборов и устройств летательных аппаратов [19, 20]. Применение РПМ также позволяет значительно уменьшить уровень высокочастотных помех в линиях связи электротехнических комплексов летательных аппаратов [21].

При размещении РПМ в плотном контакте с проводниками происходит процесс поглощения энергии перекрестных помех между линиями связи электрических жгутов внутри приборных модулей или в корпусах бортовых приборов.

Метод исследования. Для исследования эффективности ослабления перекрестных помех внутри макета приборного модуля была разработана установка для создания перекрестных помех в частотном диапазоне 10–3000 МГц, схема которой приведена на рис. 1. Перекрестная помеха создавалась в электрическом жгуте, состоящем из двух линий связи. Линии связи длиной 1 м выполнены из медных проводников диаметром 0,5 мм с внешней изоляцией. Жгут размещался во внутреннем пространстве на дне макета приборного модуля кубической формы с длиной ребра 250 мм, выполненного из меди. Схема размещения жгута линий связи приведена на рис. 2. Контур макета приборного модуля изображен пунктирной линией. Макет приборного модуля устанавливался на имитаторе элемента корпуса летательного аппарата в виде металлической пластины. При этом выполняется электрический контакт между корпусом макета модуля и пластиной.

Для исследования перекрестной помехи линия-источник подключалась к высокочастотному генератору. Выходная мощность генератора 0 дБм (1 мВт). Напряжение на входе линии-источника перекрестной помехи с нагрузкой $R_n = 50$ Ом равно 107 дБмкВ (~224 мВ). Напряжение перекрестной помехи на линии-рецепторе измерялось спектроанализатором в частотном диапазоне 10–3000 МГц с полосой пропускания 1 МГц. Генератор и спектроанализатор находились вне зоны действия помех.

При проведении исследований использовался радиопоглощающий материал ТПМВ-1С. Данный материал изготовлен из минеральных волокон с наполнителем из вибромолотого графита. Основные характеристики данного материала приведены в [21]. Исследования, результаты которых приведены в [22, 23], показали, что размещение РПМ внутри макета приборного модуля ослабляет излучаемую помехоэмиссию и уменьшает резонансные явления. Результаты исследований [21] позволяют сделать вывод, что применение данного РПМ на частотах свыше 500 МГц позволяет ослаблять высокочастотную помеху в линии более чем на 10 дБ.

На первом этапе исследований измерение перекрестной помехи проводилось без размещения РПМ внутри макета приборного модуля. На втором этапе линии связи закрывались РПМ внутри макета приборного модуля (рис. 1). РПМ размером 250×250×30 мм закрывали жгут снизу и сверху. Цель исследований заключалась в получении численной оценки ослабления

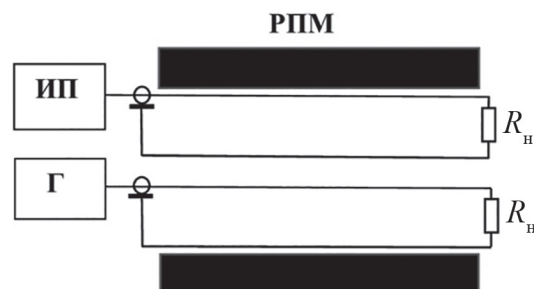


Рис. 1. Схема исследования перекрестной помехи между линиями связи: ИП – измерительный прибор (спектроанализатор); Г – генератор; РПМ – радиопоглощающий материал; R_n – сопротивление нагрузки

Fig. 1. Scheme for studying crosstalk between transmission lines: ИП – measuring device (spectroanalyzer); Г – generator; РПМ – radar absorbing material; R_n – load resistance

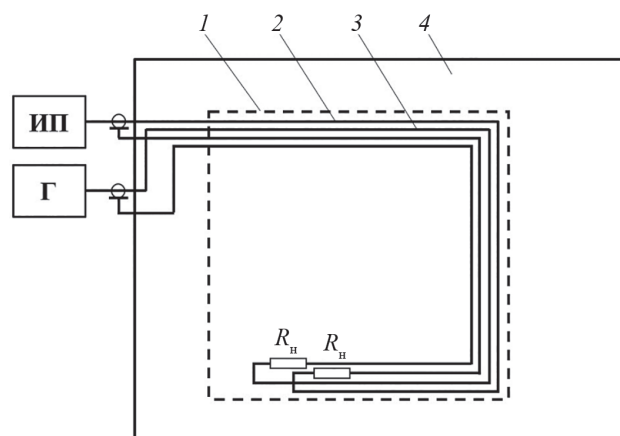


Рис. 2. Схема размещения жгута линий связи внутри макета приборного модуля: 1 – корпус макета; 2, 3 – линии связи; 4 – металлическая пластина; ИП – измерительный прибор (спектроанализатор); Г – генератор; R_n – сопротивление нагрузки

Fig. 2. Layout of the transmission lines in the internal space of the case module: 1 – case module; 2, 3 – transmission lines; 4 – metal plate; ИП – measuring device (spectroanalyzer); Г – generator; R_n – load resistance

перекрестных высокочастотных помех между линиями связи жгута, закрытого РПМ.

Результаты. Частотная диаграмма напряжения перекрестной помехи в жгуте линий связи, не закрытом РПМ внутри приборного модуля, в диапазоне 10–3000 МГц изображена на рис. 3.

Частотная диаграмма (рис. 3) имеет ярко выраженный резонансный характер, который проявляется в очередном возрастании и убывании напряжения перекрестной помехи на разных частотах. Разность между максимальным и минимальным значениями напряжения перекрестной помехи составляет более 20 дБмкВ. С ростом частоты от 10 до 3000 МГц максимальные значения напряжения перекрестной помехи снижаются со 101 до 77 дБмкВ.

Частотная диаграмма напряжения перекрестной помехи в жгуте линий связи при размещении

U , дБмкВ

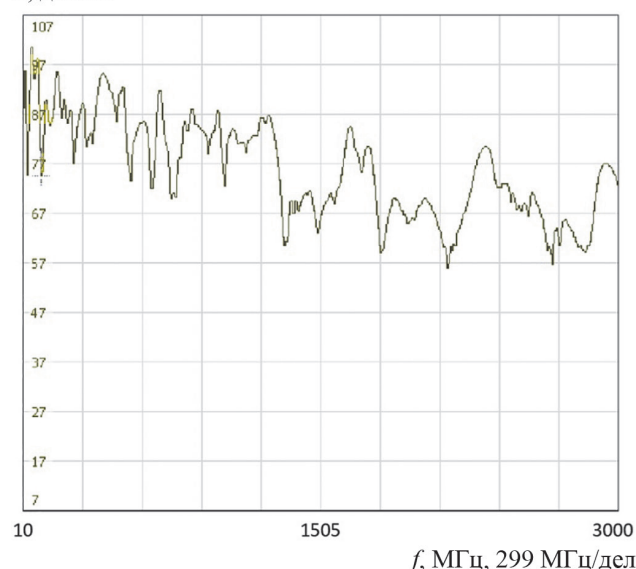


Рис. 3. Частотная диаграмма напряжения перекрёстной помехи между линиями связи жгута, не закрытого радиопоглощающим материалом

Fig. 3. Crosstalk voltage frequency diagram between transmissions lines of a bundle without radar absorbing material

РПМ внутри макета приборного модуля изображена на рис. 4.

Максимальные значения напряжения перекрестной помехи частотной диаграммы на рис. 4. с ростом частоты от 40 до 3000 МГц последовательно уменьшаются. Резонансные колебания напряжения с ростом частоты сглаживаются, и разности между максимальным и ми-

U , дБмкВ

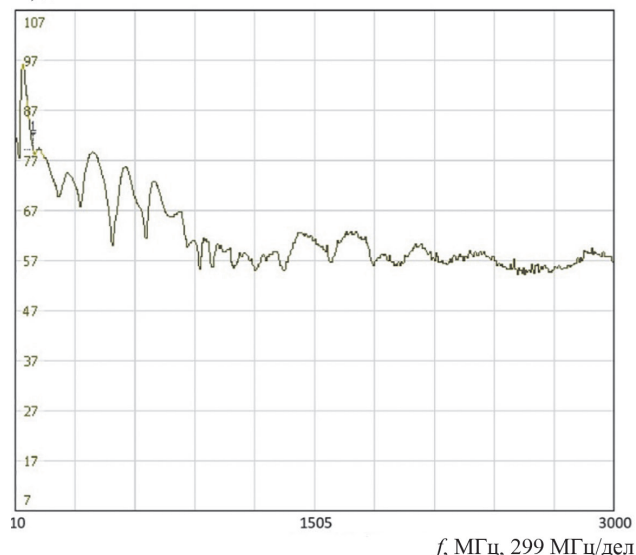


Рис. 4. Частотная диаграмма напряжения перекрёстной помехи между линиями связи жгута, закрытого радиопоглощающим материалом

Fig. 4. Frequency diagram of crosstalk voltage between transmission lines of a bundle covered with radar absorbing material

нимальными значениями становятся значительно меньше 20 дБмкВ. Из анализа частотных диаграмм рис. 3 и 4 следует, что напряжение перекрёстной помехи в линии связи-рецепторе жгута с РПМ с увеличением частоты уменьшается по сравнению с напряжением перекрёстной помехи в жгуте, не закрытом РПМ. Разность между максимальными значениями напряжений перекрёстной помехи диаграмм составляет более 20 дБмкВ. Максимальная разность 31 дБмкВ достигается на частоте 1206 МГц.

Выводы. Применение РПМ приводит к значительному уменьшению напряжения перекрёстной помехи между линиями связи в жгуте. Значения перекрёстной помехи в жгуте, закрытом РПМ, с ростом частоты меньше максимальных значений перекрестной помехи в жгуте, не закрытом РПМ, на 20 дБмкВ. Максимальная разность перекрестных помех составляет 31 дБмкВ.

Уменьшение напряжения перекрёстной помехи в жгуте линий связи с РПМ позволяет сделать вывод об эффективном применении РПМ для ослабления перекрёстных помех между линиями связи в жгутах бортовой кабельной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 843 p.
2. Барис Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990, 238 с.
3. Нгуен В.Т., Кириллов В.Ю. Перекрестные помехи в электрических соединителях. – Электричество, 2021, № 3, с. 54–59.
4. Гетманец А.Н. и др. Передача наведенных электромагнитными полями токов и напряжений по цепям связи. – Технологии электромагнитной совместимости, 2020, № 3(74), с. 3–24.
5. Noise, Cross-talk, Jitter, Skew and EMI. Section 6. Backplane Designer's guide. Fairchild Semiconductor Corporation MS500736, 2002, 11 p.
6. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017, 423 с.
7. 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.
8. Hill D.A., Cavcey K.H., Johnk R.T. Cross-Talk Between Microstrip Transmission Lines. – IEEE Transactions on EMC, 1994, vol. 36, No. 4, pp. 314–321, DOI:10.1109/15.328861.
9. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. Prentice Hall PTR, 2003, 432 p.
10. Нгуен В.Т., Кириллов В.Ю. Перекрестные помехи во внутреннем пространстве бортового приборного модуля. – Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021, № 2, с. 563–568.
11. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2019, 722 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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
15. 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.

16. **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.

17. **Каликинцев Д.А. и др.** Радиопоглощающие экранирующие характеристики композитов на основе магнитного и электропроводящего материалов. – 18 международная конференция “Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)”, 2021, с.313–322.

18. **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.

19. **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.

20. **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.

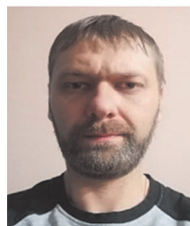
21. **Кириллов В.Ю., Жуков П.А., Торлупа А.А.** Применение радиопоглощающих материалов для ослабления высокочастотных помех в электрических цепях электротехнических комплексов летательных аппаратов. – Электричество, 2022, № 4, с. 66–71.

Поступила в редакцию [04.03.2023]
Принята к публикации [25.05.2023]

Авторы:



Кириллов Владимир Юрьевич – доктор техн. наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.



Торлупа Андрей Александрович – аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.



Томилин Максим Михайлович – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

Elektrichestvo, 2023, No. 7, pp. 47–51

DOI:10.24160/0013-5380-2023-7-47-51

The Use of Radar Absorbing Materials to Reduce Crosstalk in the Aircraft Electrical System Circuits

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

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

TOMILIN Maxim M. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) Docent of the Theoretical Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.).

High-frequency electromagnetic interference is induced in the electrical circuits of aircraft electrical systems under the influence of external electromagnetic fields penetrating into the aircraft structure through the aircraft body's radio-transparent parts. High-frequency interference propagates in the electrical system circuits through cross capacitive and inductive links, as well as due to electromagnetic field radiation by the conductors of electrical bundle communication lines. To weaken cross links and, accordingly, to reduce the crosstalk level, the communication lines in electrical bundles are shielded with braid or solid screens. The crosstalk can be weakened and its propagation paths in the communication lines of electric bundles and the circuits of on-board electrical system's instruments and devices can be eliminated, apart from shielding, by using radar absorbing materials. The placement of radar absorbing materials in close proximity to the communication line conductors makes it possible to attenuate crosstalk by absorbing the energy of the electromagnetic fields they produce. By using the experimental study results presented in the article it is possible to evaluate the effectiveness of crosstalk attenuation in the frequency band 10–3000 MHz by using a radar absorbing material. The use of radar absorbing material makes it possible to achieve a reduction in the crosstalk voltage between the communication lines in the electrical bundle by 20–30 dBμV.

Key words: aircraft, crosstalk, radar absorbing material, electrotechnical complex

REFERENCES

1. **Ott H.W.** Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 843 p.
2. **Barns J.** *Elektronnoe konstruirovaniye: Metody bor'by s pomekhami* (Electronic Design: Anti-Interference Methods). M.: Mir, 1990, 238 p.
3. **Nguyen V.T., Kirillov V.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 3, pp. 54–59.
4. **Getmanets A.N. et al.** *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – in Russ. (Electromagnetic Compatibility Technologies)*, 2020, No. 3 (74), pp. 3–24.
5. **Noise**, Cross-talk, Jitter, Skew and EMI. Section 6. Backplane Designer's guide. Fairchild Semiconductor Corporation MS500736, 2002, 11 p.
6. **Kechiev L.N.** *Pechatnye platy i uzly gigabitnoy elektroniki* (Printed Circuit Boards and Nodes of Gigabit Electronics). M.: Grifon, 2017, 423 p.
7. **Gizatullin Z.M., Chermoshentsev S.F.** *Informatsionnye tekhnologii – in Russ. (Information Technology)*, 2010, No. 6, pp. 2–7.
8. **Hill D.A., Cavcey K.H., Johnk R.T.** Cross-Talk Between Microstrip Transmission Lines. – IEEE Transactions on EMC, 1994, vol. 36, No. 4, pp. 314–321, DOI:10.1109/15.328861.
9. **Brooks D.** Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. Prentice Hall PTR, 2003, 432 p.
10. **Nguyen V.T., Kirillov V.Yu.** *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – in Russ. (Proceedings of Tula State University. Technical Sciences)*, 2021, No. 2, pp. 563–568.
11. **Kechiev L.N.** *Ekranirovaniye radioelektronnoy apparatury. Inzhenernoe posobie* (Shielding of Electronic Equipment. Engineering Manual). M.: Grifon, 2019, 722 p.
12. **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.
13. **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.
14. **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
15. **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/RSEM.2017.8103597.
16. **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.
17. **Kalikintseva D.A. et al.** 18 mezhdunarodnaya konferentsiya "Elektromagnitnoe pole i materialy (fundamental'nye fizicheskie issledovaniya)" – in Russ. (18th International Conference "Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Research)"), 2021, pp. 313–322.
18. **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.
19. **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.
20. **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.
21. **Kirillov V.Yu., Zhukov P.A., Torlupa A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 4, pp. 66–71.

Received [04.03.2023]

Accepted [25.05.2023]