

Перекрестные помехи в электрических соединителях

НГУЕН ВАН ТАЙ, КИРИЛЛОВ В.Ю.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

Перекрестные электромагнитные помехи возникают в бортовых электрических жгутах электротехнических комплексов летательных аппаратов при воздействии внешних электромагнитных полей. Эффективное ослабление перекрестных помех и устранение путей их распространения в жгутах может быть достигнуто экранированием проводников электрических жгутов и жгутов в целом без разрывов и неоднородностей между экранами и кожухами электрических соединителей. Экранирование проводников жгутов не устраняет полностью пути распространения перекрестных помех — они могут распространяться через контакты электрических соединителей. Для оценки влияния электрических соединителей на уровни перекрестных помех в электрических цепях электротехнических комплексов необходимы экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования основаны на измерении напряжения помехи на контактах-рецепторах при подаче напряжения «полезного» сигнала на контакты-источники в заданном частотном диапазоне. Результаты экспериментальных исследований перекрестных помех для различных типов электрических соединителей в заданном частотном диапазоне позволяют оценить резонансный характер и уровни перекрестных помех в зависимости от взаимного расположения контактов и значения частоты.

К л ю ч е в ы е с л о в а: летательные аппараты, электротехнические комплексы, электромагнитные поля, воздействие, перекрестные электромагнитные помехи, электрические соединители

Бортовая сеть электротехнического комплекса летательного аппарата состоит из большого числа электрических жгутов проводников и электрических соединителей, предназначенных для передачи и распределения энергии, информационных и управляющих сигналов. Из-за наличия емкостных и индуктивных связей между проводниками жгутов возникают перекрестные помехи, которые могут нарушать условия электромагнитной совместимости проводников в электрических жгутах, ухудшать качество функционирования бортовых приборов и устройств электротехнических комплексов [1–7]. Перекрестные помехи возникают между проводниками и узлами печатных плат [8–13], линиями связи [14–16] и контактами электрических соединителей [9].

Физическая природа перекрестных помех заключается в передаче электромагнитной энергии из цепи источника помехи в соседнюю цепь — рецептор помехи.

Перекрестные помехи могут влиять на амплитудные значения информационных и управляющих сигналов и общий уровень шума в электрических цепях. Негативное воздействие перекрестных помех еще больше усугубляется снижением напряжений полезных сигналов и повышением чувстви-

тельности к шуму, которые обусловлены тенденцией снижения мощности в электротехнических комплексах и системах. Уменьшение уровней перекрестных помех — одна из важнейших задач электромагнитной совместимости и обеспечения целостности передаваемых информационных и управляющих сигналов [8]. При анализе перекрестных помех, распространяющихся через емкостные связи, необходимо, в первую очередь, оценивать перекрестные помехи близко расположенных электрических цепей [9]. Перекрестные помехи через емкостные связи могут достигать больших значений при непосредственной близости, но ослабевают при увеличении расстояния между источником помехи и рецептором.

В высокоплотных электрических соединителях экранированы и емкостные связи между ними, создают пути распространения перекрестных помех, которые переходят на смежные пары проводников и распространяются по бортовой электрической сети. Уровни перекрестных помех, распространяющихся через контакты электрических соединителей, могут превышать допустимые нормативные значения, заданные для чувствительных элементов бортового электротехнического комплекса летательного аппарата даже при экранировании пар проводников в

жгутах и самих жгутов бортовой электрической сети. Поэтому важной задачей является оценка уровней перекрестных помех не только между проводниками электрических жгутов, но и между контактами электрических соединителей.

Метод исследования. Для исследования перекрестных помех были использованы электрические соединители двух типов. Схема исследования перекрестных помех между контактами соединителя первого типа приведена на рис. 1.

Контакты электрического соединителя соединяются с генератором высокой частоты, нагрузкой и приемником коаксиальными кабелями. Напряжение от генератора через контакты 1, 2 электрического соединителя подается на согласованную нагрузку сопротивлением 50 Ом с помощью коаксиальных кабелей. Измерительный приемник соединяется с согласованной нагрузкой сопротивлением 50 Ом через другую пару контактов, например 5 и 6 (рис. 1), также с помощью коаксиальных кабелей.

Схема исследования перекрестных помех электрического соединителя второго типа приведена на рис. 2,а, на рис. 2,б показана схема расположения контактов данного электрического соединителя.

Для оценивания влияния первой пары контактов 1, 2 на остальные пары контактов электрических соединителей измерительный приемник с согласованной нагрузкой поочередно подключается: у электрического соединителя первого типа к парам контактов 3, 4; 5, 6; 9, 10, а у электрического соединителя второго типа к парам контактов 3, 4; 6, 7; 9, 10.

В схемах рис. 1 и рис. 2. пара контактов 1, 2, подключенная к генератору, является источником перекрестной помехи. Остальные пары контактов, к которым подключается измерительный приемник, являются рецепторами перекрестной помехи.

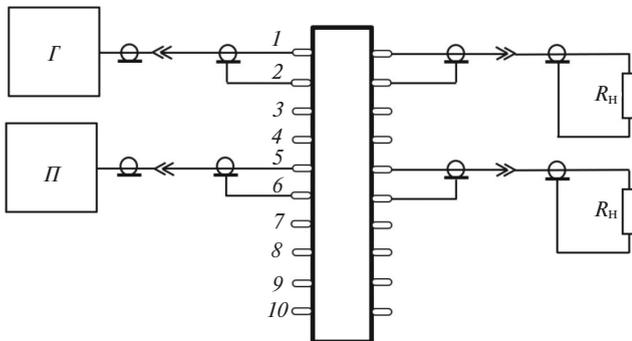


Рис. 1. Схема исследования перекрестной помехи между контактами электрического соединителя первого типа: Г – генератор; П – измерительный приемник; R_H – сопротивление согласованной нагрузки

Fig. 1. Study diagram of the crosstalk between the contacts of the first type electrical connector: Г – generator; П – measuring receiver; R_H – the resistance of the matched load

К паре контактов 1, 2 электрических соединителей подключался высокочастотный «tracking» генератор, входящий в состав измерительного приемника HMS-X. Выходная мощность «tracking» генератора устанавливалась равной 0 дБм (1 мВт), что создает на нагрузке 50 Ом и соответственно между контактами 1 и 2 напряжение 107 дБмкВ (224 мВ), которое уменьшается с увеличением частоты генератора. Напряжение перекрестной помехи на контактах-рецепторах измерялось синхронизированным с генератором измерительным приемником, работающим в режиме спектроанализатора в регулируемом частотном диапазоне от 100 кГц до 3000 МГц. Напряжения перекрестных помех измерялись между парами контактов, расположенных на различных расстояниях в пределах конструкции электрических соединителей.

Для измерения напряжения на контактах 1, 2, являющихся источниками перекрестных помех, измерительный приемник с входным сопротивлением 50 Ом подключался к контактам 1, 2 вместо согласованной нагрузки. Экспериментальные диаграммы напряжений перекрестных помех на различных парах контактов-рецепторов электрических соединителей в заданном частотном диапазоне позволяют оценивать уровни напряжений перекрестных помех и сравнивать их с напряжением сигнала на контактах-источниках помехи.

Результаты. На рис. 3 приведены частотные диаграммы перекрестных помех между контактами электрического соединителя первого типа. Частот-

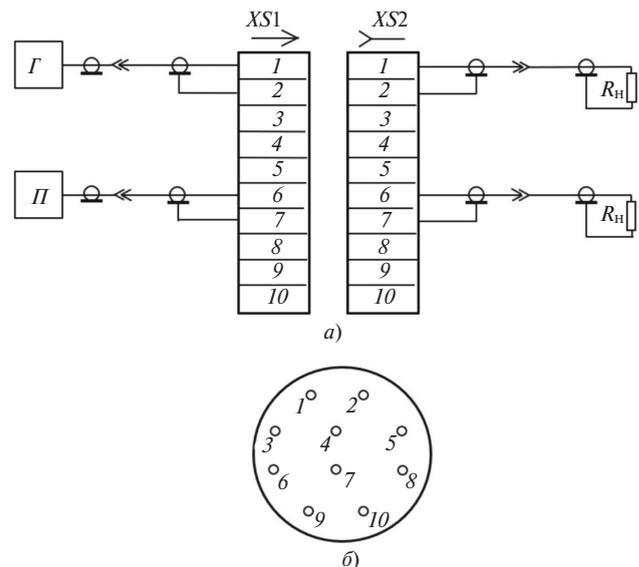


Рис. 2. Схема исследования перекрестной помехи между контактами электрического соединителя второго типа (а): Г – генератор; П – измерительный приемник; R_H – сопротивление согласованной нагрузки; б – схема расположения контактов

Fig. 2. Study diagram of the crosstalk between the contacts of the second type electrical connector (а): Г – generator; П – measuring receiver; R_H – the resistance of the matched load; б – the layout of the contacts

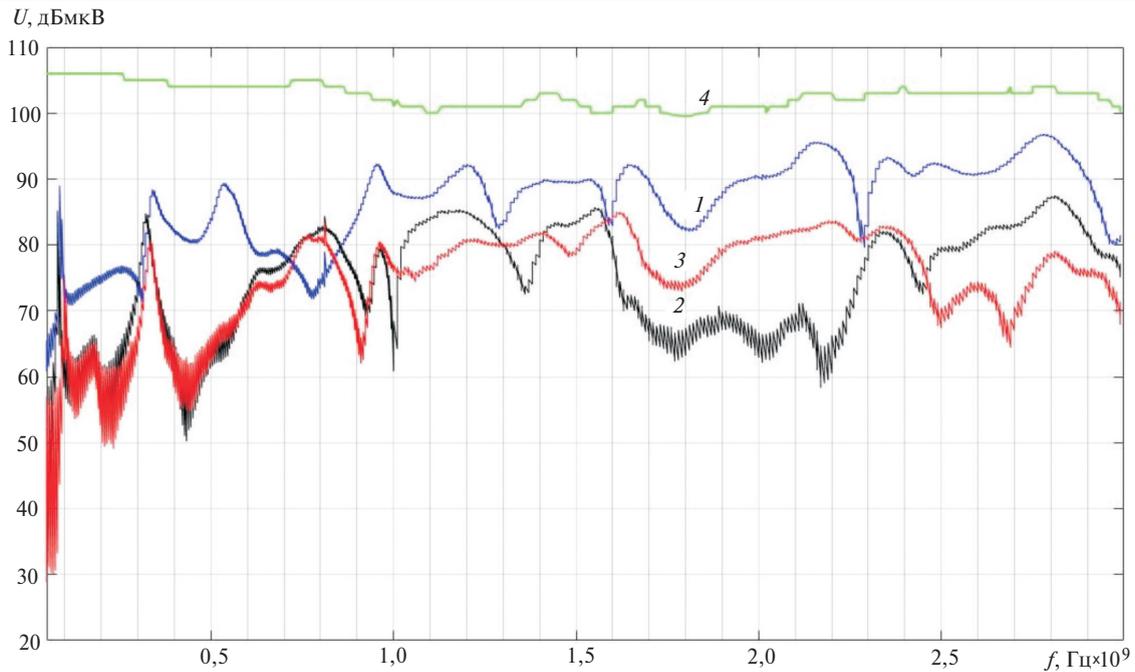


Рис. 3. Частотные диаграммы напряжения перекрестной помехи между контактами электрического соединителя первого типа: 1 — между контактами 1, 2 и 3, 4; 2 — между контактами 1, 2 и 5, 6; 3 — между контактами 1, 2 и 9, 10; 4 — частотная диаграмма напряжения на контактах 1, 2

Fig. 3. Frequency diagrams of the crosstalk voltage between the contacts of the first type electrical connector: 1 — between 1, 2 and 3, 4 contacts; 2 — between 1, 2 and 5, 6 contacts; 3 — between 1, 2 and 9, 10 contacts; 4 — frequency diagram of the voltage at contacts 1, 2

ные диаграммы 1, 2, 3 — зависимости напряжения перекрестных помех на контактах-рецепторах 3, 4; 5, 6 и 9, 10 соответственно.

На рис. 4 — частотные диаграммы напряжения перекрестных помех между контактами электриче-

ского соединителя второго типа. Диаграммы 1, 2, 3 — частотные зависимости напряжения перекрестных помех между контактами 3, 4; 6, 7 и 9, 10 электрического соединителя.

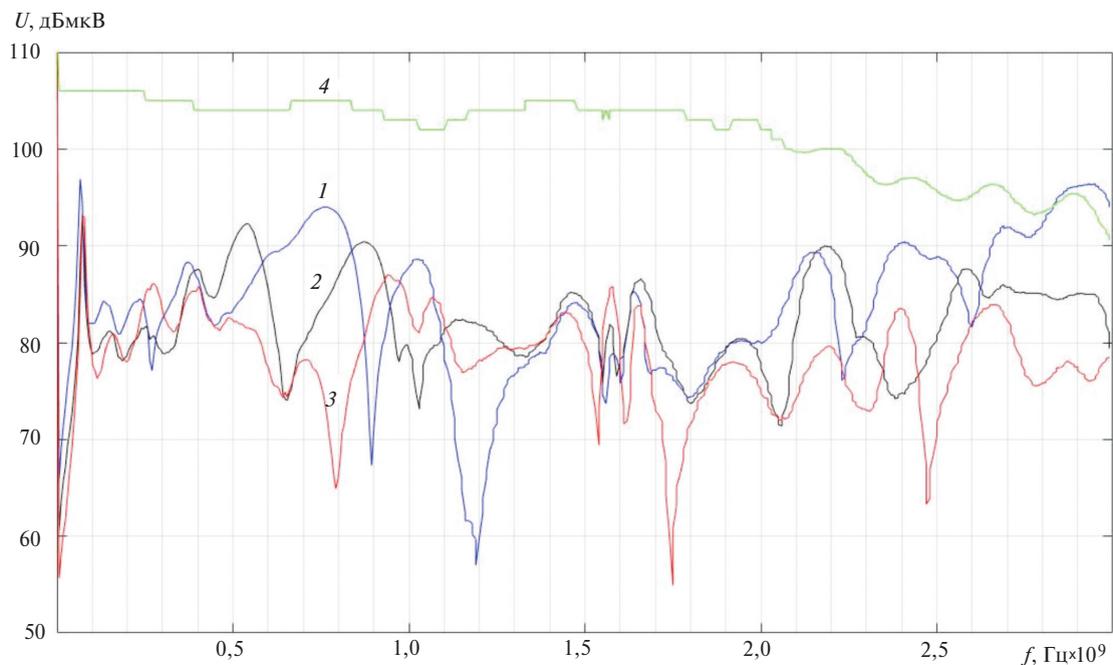


Рис. 4. Частотные диаграммы напряжения перекрестной помехи электрического соединителя второго типа: 1 — между контактами 1, 2 и 3, 4; 2 — между контактами 1, 2 и 6, 7; 3 — между контактами 1, 2 и 9, 10; 4 — частотная диаграмма напряжения на контактах 1, 2

Fig. 4. Frequency diagrams of the crosstalk voltage of the second type electrical connector: 1 — between 1, 2 and 3, 4 contacts; 2 — between 1, 2 and 6, 7 contacts; 3 — between 1, 2 and 9, 10 contacts; 4 — frequency diagram of voltage at contacts 1, 2

Диаграммы под номером 4 на рис. 3 и 4 выражают частотную зависимость напряжения, создаваемого генератором на контактах 1, 2 электрических соединителей первого и второго типов.

Из анализа частотной диаграммы 1 на рис. 3 следует, что перекрестная помеха между контактами 1, 2 и 3, 4 электрического соединителя первого типа достигает на частоте 339 МГц значения 88,4 дБмкВ (26,3 мВ), что составляет 0,12 от напряжения 224 мВ, создаваемого генератором в цепи пары контактов 1, 2 на данной частоте. С увеличением частоты уровень перекрестной помехи между контактами 1, 2 и 3, 4 возрастает. На частоте 959 МГц значение напряжения перекрестной помехи 92,3 дБмкВ (41,2 мВ), на значительно более высокой частоте 2790 МГц значение помехи составляет 96,8 дБмкВ (69,2 мВ), что составляет 0,44 от напряжения 104 дБмкВ (158,5 мВ) на контактах 1, 2 электрического соединителя.

При увеличении расстояния между контактами электрического соединителя первого типа уменьшаются значения уровней перекрестной помехи в пределах заданного частотного диапазона 100 кГц – 3000 МГц. Максимальное значение перекрестной помехи на частоте 2790 МГц между наиболее удаленными парами контактов 1, 2 и 9, 10 на диаграмме 3 (рис. 3) составляет 87,2 дБмкВ (23 мВ).

Из-за резонансных явлений на высоких частотах отмечена значительная неравномерность частотных характеристик напряжения перекрестных помех. Резонансные явления проявляются в том, что, например, на вышеуказанной частоте 2790 МГц напряжение перекрестной помехи для близко расположенных пар контактов 1, 2 и 3, 4 равно 78,7 дБмкВ и по значению меньше, чем напряжение перекрестной помехи на данной частоте для расположенных на большем расстоянии пар контактов 1, 2 и 9, 10.

Из сравнительного анализа частотных диаграмм электрического соединителя второго типа, приведенных на рис. 4, следует, что напряжение перекрестной помехи между контактами 1, 2 и 3, 4 на первой резонансной частоте 66 МГц равно 96,9 дБмкВ (70 мВ). Такое значение напряжения составляет 0,31 от напряжения на контактах 1, 2. Вследствие резонансных явлений напряжение на наиболее удаленных контактах 9, 10 может превышать напряжение перекрестной помехи на контактах 3, 4, наиболее близких к контактам 1, 2. На резонансной частоте 1580 МГц наибольшее напряжение перекрестной помехи 85,9 дБмкВ (19,7 мВ) имеет место на наиболее удаленных контактах 9,10, а наименьшее напряжение 78,9 дБмкВ (8,8 мВ) – на паре ближних контактов 3, 4. С ростом частоты

разность между напряжением на контактах-источниках помехи 1, 2 и напряжением перекрестной помехи на контактах-рецепторах 3, 4 неравномерно изменяется в сторону уменьшения. На частоте 2900 МГц напряжение перекрестной помехи на контактах-рецепторах, равное 96,2 дБмкВ (65 мВ), превышает напряжение 95,2 дБмкВ (58 мВ) на контактах-источниках 1, 2 в 1,12 раза.

Заключение. Частотные характеристики перекрестных помех на смежных контактах-рецепторах электрических соединителей в частотном диапазоне 0,1–3000 МГц имеют резко выраженный резонансный характер. Колебания значений напряжения перекрестных помех на контактах-рецепторах в заданном диапазоне частот могут достигать ~30 дБмкВ. Уровни перекрестных помех в электрических соединителях зависят от расстояния между контактами и частотного диапазона.

Наибольший уровень напряжения перекрестной помехи – на ближайших контактах соединителя и повышается с ростом частоты. Из-за резонансных явлений напряжение на контактах-рецепторах, более отдаленных от контактов-источников, может превышать напряжение на ближних контактах-рецепторах. На резонансной частоте напряжение перекрестной помехи на контактах-рецепторах может превышать напряжение на контактах-источниках. На частоте 2900 МГц напряжение перекрестной помехи на контактах-рецепторах превышает напряжение на контактах-источниках помехи в 1,12 раза.

Анализ экспериментальных частотных диаграмм показал, что на резонансных частотах напряжение перекрестной помехи на контактах-рецепторах может изменяться в пределах от 0,12 до 0,44 от напряжения на контактах-источниках, к которым приложено напряжение «полезного» управляющего или информационного сигнала, и может даже превышать это напряжение.

На основе проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что если в составе электротехнического комплекса летательного аппарата имеются элементы, чувствительные к высокочастотным электромагнитным помехам, то для обеспечения электромагнитной совместимости необходимо проводить оценку на основе экспериментальных исследований уровней напряжений перекрестных помех в электрических соединителях бортовой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henry W. Ott. Electromagnetic compatibility engineering. – John Wiley & Sons, Inc., 2009, 843 p.
2. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990, 238 с.

3. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издат. дом «Технологии», 2003, 540 с.
4. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. М.: Издат. дом «Технологии», 2004, 508 с.
5. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кузечкин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003, 768 с.
6. Жуков П.А., Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Влияние способов соединения экранов кабеля с электрическим соединителем на эффективность экранирования. – Вестник МЭИ, 2019, № 2, с. 50–55.
7. Гизатуллин З.М., Чермошенин С.Ф. Моделирование электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при внешнем гармоническом электромагнитном воздействии. – Информационные технологии, 2010 № 6, с. 2–7.
8. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ИДТ, 2007, 616 с.
9. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Гриффон, 2017, 423 с.
10. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. Prentice Hall PTR, 2003, 432p.
11. Noise, Cross-talk, Jitter, Skew and EMI. Section 6. Backplane Designer's guide. 2002. Fairchild Semiconductor Corporation MS500736, 11 p.
12. Hill D., Cavcey K., Johnk R. Cross-talk between microstrip transmission lines. – IEEE Trans. on EMC 1994, vol. 4, pp. 314–321.

13. Джонсон Г., Грехем М. Высокоскоростная передача цифровых данных : высший курс черной магии/Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005, 1024 с.

14. Гетманец А.Н., Прудкой Н.А., Прозоров В.Б., Лебединская А.В. Передача наведенных электромагнитными полями токов и напряжений по цепям связи. – Технологии электромагнитной совместимости, 2020, № 3 (74), с. 3–25.

15. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2014, 171 с.

16. Нгуен Ван Тай, Кириллов В.Ю. Перекрестные помехи в электрических жгутах с неоднородностями экранов. – Вестник МЭИ, 2020, № 6, с. 76–81.

[29.10.2020]



А в т о р ы: Нгуен Ван Тай – аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) – МАИ (НИУ).



Кириллов Владимир Юрьевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» МАИ (НИУ).

Elektrichestvo, 2021, No. 3, pp. 54–59

DOI:10.24160/0013-5380-2021-3-54-59

Crosstalk in Electrical Connectors

NGUYEN Van Tai (*Moscow Aviation Institute (National Research University) – MAI (NRU), Moscow, Russia*) – *Engineering, Dept.*

KIRILLOV Vladimir Yu. (*MAI (NRU), Moscow, Russia*) – *Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.)*

Crosstalk electromagnetic interference occurs in on-board electrical wire bundles of aircraft electrical systems under the effect of external electromagnetic fields. Efficient reduction of crosstalk and elimination of their propagation paths in wire bundles can be achieved by shielding the conductors in the bundles and the bundles as a whole without breaks and discontinuities between the shields and housings of electrical connectors. The shielding of conductors in bundles does not eliminate the crosstalk completely, which can propagate through the contacts of electrical connectors. For estimating the influence of electrical connectors on the levels of crosstalk in electrical system circuits, their experimental studies should be carried out. In the course of these experimental studies, the interference voltage induced at the receptor contacts when voltage is applied to the source contacts in the specified frequency band is measured. The results from experimental studies of crosstalk for various types of electrical connectors in a specified frequency band make it possible to evaluate the resonance nature and levels of crosstalk interference levels depending on the relative position of the contacts and frequency.

Key words: *aircraft, electrical systems, electromagnetic fields, influence, electromagnetic crosstalk, electrical connectors*

REFERENCES

1. Henry W. Ott. Electromagnetic compatibility engineering – John Wiley & Sons, Inc., 2009, 843 p.
2. Barns Dzh. *Elektronnoye konstruirovaniye: Metody bor'by s pomexhami* (Electronic design: Methods of dealing with interference). М.: Mir, 1990, 238 p.
3. Uill'yams T. *EMS dlya razrabotchikov produktsii* (EMS for Product Developers). М.: Izdat. dom «Tehnologii», 2003, 540 p.

4. Uill'yams T., Armstrong K. *EMS dlya sistem i ustanovok* (EMC for systems and installations). М.: Izdat. Dom «Tehnologii», 2004, 508 p.

5. D'yakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K., Kuzhekin I.P., Zhukov A.V. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* (Electromagnetic compatibility in the electric power industry and electrical engineering). М.: Energoatomizdat, 2003, 768 p.

6. **Zhukov P.A., Kirillov V.Yu., Marchenko M.V.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2019, No.2, pp. 50–55.
7. **Gizatullin Z.M., Chermoshentsev S.F.** *Informatsionnyye tekhnologii – in Russ. (Information technologies)*, 2010 No. 6, pp. 2–7.
8. **Kechiyev L.N.** *Proyektirovaniye pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystviyushchey apparatury* (Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment). M.: IDT, 2007, 616 p.
9. **Kechiyev L.N.** *Pechatnyye platy i uzly gigabitnoy elektroniki* (Printed circuit boards and gigabit electronics assemblies). M.: Griffon, 2017, 423 p.
10. **Brooks D.** *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Desig.-prentice Hall PTR*, 2003, 432p.
11. **Noise**, Sross-talk, Jitter, Skew and EMI. Section 6. Backplane Designer's guide. 2002. Fairchild Stmiconductor Corporation MS500736, 11 p.
12. **Hill D., Cavcey K., Johnk R.** Cross-talk between microstrip tpansmission lines. – *IEEE Trans. on EMC*, 1994, vol. 4, pp. 314–321.
13. **Dzhonson G., Grekhem M.** *Vysokoskorostnaya peredacha tsifrovyykh dannykh: vysshiy kurs chernoy magii/Per. s angl.* (High-speed transmission of digital data: the highest course of black magic / Trans. from English). M.: Izdat. dom «Vil'yams», 2005, 1024 p.
14. **Getmanets A.N., Prudkoy N.A., Prozorov V.B., Lebedinskaya A.V.** *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti – in Russ. (Technologies of Electromagnetic Compatibility)*, 2020, No. 3 (74), pp. 3–25.
15. **Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M.** *Elektromagnitnaya sovmestimost' bortovoy kabel'noy seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of the on-board cable network of aircraft). M.: Izd-vo MAI, 2014,171 p.
16. **Nguyen Van Tay, V.Yu.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2020, No. 6, pp. 76–81.

[29.10. 2020]