

УДК 629.7.05; 621.391.82

Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата

Нуриев М.Г.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.

Туполева-КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

e-mail: gzm_zinnur@mail.ru

Аннотация

На основе методики физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи реализовано прогнозирование помехоустойчивости бортовых электронных средств беспилотного летательного аппарата при воздействии удаленного разряда молнии. Проведен расчет всех этапов методики физического моделирования. Выбрано имитационное и измерительное оборудование, разработан экспериментальный стенд и макет объекта исследования. Представлен пример физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи электронных систем беспилотного летательного аппарата. Проведено прогнозирование помехоустойчивости электронных элементов беспилотного летательного аппарата при воздействии электромагнитных помех удаленного разряда молнии.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, электронное средство, помехоустойчивость, электромагнитная помеха, физическое моделирование, разряд молнии, прогнозирование.

Введение

Последнее десятилетие отмечено увеличением темпов роста развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за счет использования их в различных целях не только для военного назначения, но и для гражданской области. В России БПЛА в гражданских целях широко стали использоваться с 2010 года, а в 2017 году Российский рынок беспилотных средств увеличился еще на 87%. БПЛА позволяют снизить на порядок себестоимость услуг, связанных с дистанционным наблюдением, контролем окружающей среды и объектов в режиме реального времени, по сравнению с традиционными космическими или авиационными системами [1, 2, 3]. Кроме того, современные БПЛА используются в качестве одного из важнейших средств повышения боевых возможностей вооруженных сил.

В связи с разнообразием задач, выполняемых БПЛА в различных климатических условиях и местах базирования, во время дежурства и на траектории полета по условиям эксплуатации БПЛА могут подвергаться воздействию источников электромагнитных помех, в том числе электромагнитному полю удаленного разряда молнии [4, 5]. Бортовое электронные и радиоэлектронные средства, система электропитания и исполнительные механизмы, входящие в состав системы управления и навигации БПЛА распределены по различным конструкционным частям (крыло, фюзеляж и др.) и соединены между собой структурированной кабельной системой (двухпроводные линии связи, коаксиальный кабель, витая пара и т.п.), которая является хорошим «приемником» электромагнитных помех [6, 7, 8]. Тем более в последние годы наметилась тенденция к разработке БПЛА с фюзеляжем из неметаллических материалов [9],

которые имеют невысокие показатели эффективности экранирования электромагнитных полей. Поэтому, электромагнитные помехи могут привести к частичному нарушению или полной потере передаваемого информационного сигнала бортового электронного средства, что влечет за собой сбой в одном или нескольких звеньях системы управления и навигации БПЛА.

Одним из возможных подходов для решения задачи анализа помехоустойчивости электронных средств БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии является применение масштабного физического эксперимента – физическое моделирование. В работах [10-15] были рассмотрены и предложены математические модели, методика для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи электронных средств, при воздействии электромагнитных полей. Целью данной работы является практическая реализация прогнозирования помехоустойчивости электронных средств БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии на основе предложенных в [12] моделей и методики.

1. Метод решения проблемы

Физическое моделирование - метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии [16]. Необходимость применения метода физического моделирования для задач анализа электромагнитной совместимости обусловлена тем, что при изучении электромагнитных процессов протекающих в различных макрообъектах возникают трудности с изготовлением макетов, имитаторов поля в реальном масштабе или измерением быстротекущих процессов [17]. Возможность применения масштабных

моделей для физического моделирования электромагнитных задач основано на свойстве линейности уравнений Максвелла и применяется для области линейных свойств материалов. При этом, основные задачи реализации масштабных физических моделей связаны с необходимостью подбора материалов, с определенными свойствами исходя из следующих выражений [16]:

$$\varepsilon' = k_\varepsilon \varepsilon, \mu' = k_\mu \mu, \sigma' = k_\sigma \sigma, \quad (1)$$

где $\varepsilon', \varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость материалов модели и оригинала; μ', μ – магнитная проницаемость материалов модели и оригинала; σ', σ – проводимость материалов модели и оригинала; k_ε – коэффициент изменения диэлектрической проницаемости; k_μ – коэффициент изменения магнитной проницаемости; k_σ – коэффициент изменения проводимости материалов. В реальных условиях проведения масштабного эксперимента возникают сложности подбора материалов с определенными, сильно отличающимися от оригинала диэлектрическими и магнитными свойствами. Поэтому, а также исходя из условий (2) [17]:

$$k_v = \frac{1}{\sqrt{k_\varepsilon k_\mu}}, k_v = 1, \quad (2)$$

обычно придерживаются следующих значений коэффициентов $k_\varepsilon = 1, k_\mu = 1$, где k_v – коэффициент масштабирования скорости движения носителей в оригинале и модели. Тогда, согласно следующим условиям (3) [17]:

$$k_l k_\sigma k_\mu = 1, k_H = k_E \sqrt{\frac{k_\sigma k_l}{k_\mu}}, \quad (3)$$

коэффициент масштабирования проводимости равняется $k_{\sigma} = \frac{1}{k_l}$, где k_l – коэффициент изменения геометрических размеров модели; k_H – коэффициент масштабирования напряженности магнитного поля; k_E – коэффициент масштабирования напряженности электрического поля. Поэтому, в идеальном случае, масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом, с проводимостью отличающимся в k_{σ} раз. Но в тоже время, в литературе [18] содержится утверждение, что пропорциональное изменение физических размеров модели, при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей и емкостей. Поэтому считается, что для задач, где активное сопротивление сравнительно мало именно индуктивности и емкости являются определяющими при формировании электромагнитных процессов. Другим недостатком использования физического моделирования для задач связанных с анализом разряда молнии является применение относительно слабых генераторов, при воздействии которых не проявляются нелинейные эффекты. Но нелинейные эффекты наиболее сильно проявляются при наибольших токах разряда молнии (до 200 кА), что встречается относительно редко (в 80% случаях токи менее 30 кА).

2. Практическая реализация методики физического моделирования

Для решения практической задачи прогнозирования помехоустойчивости электронных систем БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии

предлагается использовать нижеприведенную методику.

1. Определены основные проектные параметры БПЛА: размеры, геометрию и материал фюзеляжа, основные конструкционные отверстия, расположение линий связи и т.п. В данном примере «приемником» электромагнитных помех в составе БПЛА считаем контур длиной 2 м, образованный обычной двухпроводной линией (вариант 1, рис. 1а) или витой парой (вариант 2, рис. 1б) с нагрузками $R=100$ Ом на обоих концах. Также, в данном примере, рассмотрим материал фюзеляжа БПЛА из стеклопластика, как наиболее неблагоприятный случай с точки зрения экранирования.

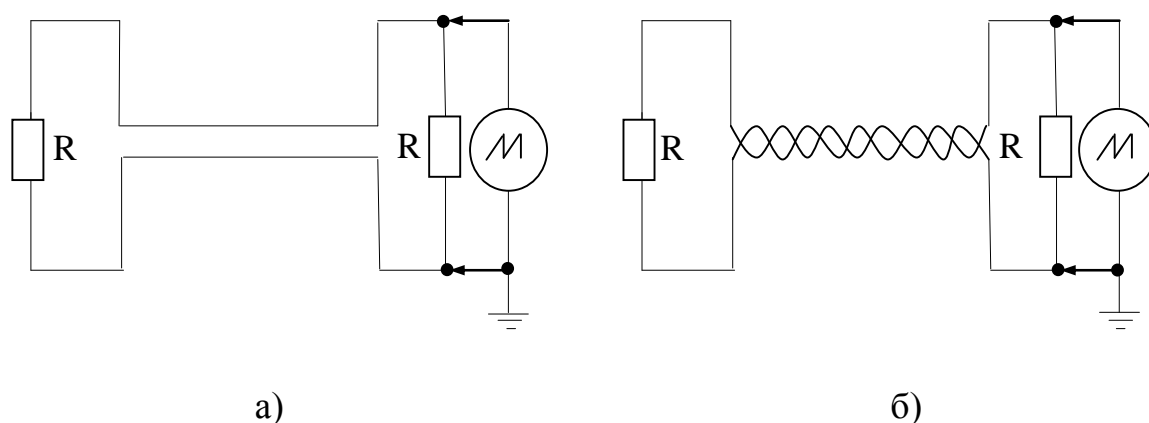


Рис. 1. Линии связи и схема измерения помех в линиях связи БПЛА

2. Определены потенциальные параметры магнитного поля удаленного разряда молнии. Например, рассмотрим импульсное магнитное поле в ближней зоне разряда молнии (рис. 2).

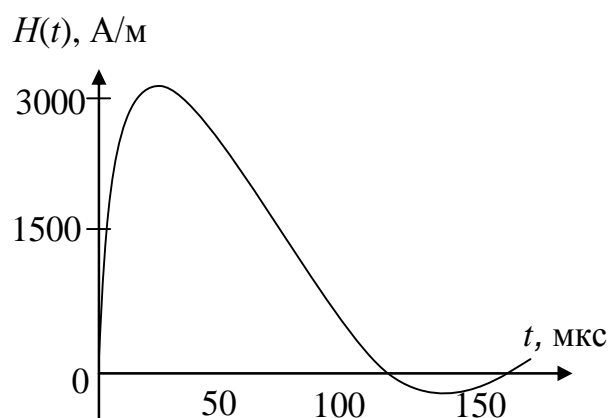


Рис. 2. Импульсное магнитное поле удаленного разряда молнии

3. Выбраны первичные масштабные коэффициенты физического моделирования (табл. 1). Данные коэффициенты в первую очередь зависят от размеров лаборатории, геометрических размеров стенда имитатора, параметров генератора, размеров объекта исследования и др.

Таблица 1

Первичные масштабные коэффициенты для физического моделирования

(модельные физические величины с индексом «'»)

Физическая величина	Масштабные коэффициенты	Пример расчета коэффициентов
Геометрические размеры (l)	$l' = k_l l$	$k_l = 1/4$
Свойства материалов: - проводимость.	$\sigma' = k_\sigma \sigma$	$k_\sigma = \frac{1}{k_l} = 4$
Время (t)	$t' = k_t t$	$k_t = 1/4$
Напряженность магнитного поля $H(t)$	$H'(t') = k_H H(t)$	$k_H = 1/3$

4. Рассчитаны значения масштабных параметров БПЛА и источника электромагнитных помех, в соответствии с принятыми масштабными коэффициентами.

5. Разработан экспериментальный стенд и масштабная модель БПЛА с исследуемым контуром внутри (рис. 3). Для создания магнитного поля используется одновитковая катушка со сторонами 1 м (рабочий объем 0,6х0,6х0,5 м). Максимальный размер масштабной модели БПЛА не превышает 0,6 м.

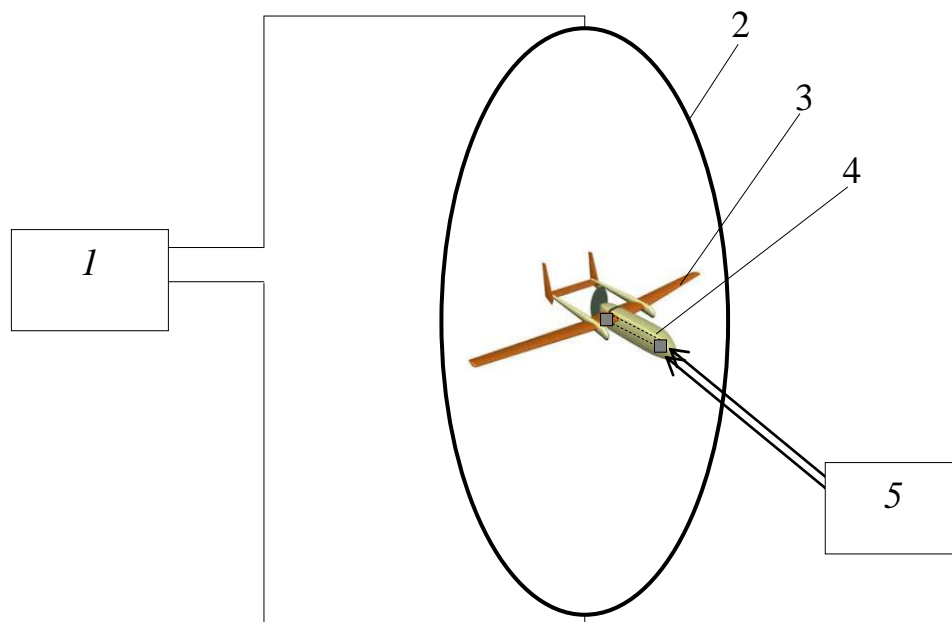


Рис. 3. Стенд для физического моделирования (1 – генератор; 2 – катушка; 3 – модель БПЛА; 4 – исследуемый контур; 5 – осциллограф)

6. Проведены экспериментальные исследования по измерению электромагнитных помех $U'(t')$ в линиях связи масштабной модели БПЛА при воздействии магнитного поля удаленного разряда молнии (рис. 4а, в).

7. На основе измеренных значений проведено физическое моделирование электромагнитных помех $U(t)$ в линиях связи реальной БПЛА при воздействии

магнитного поля удаленного разряда молнии, в соответствии со следующими выражениями (4)(рис. 4б, з):

$$U'(t') = \mu_0 a' b' \frac{dH'(t')}{dt'} = \mu_0 k_i^2 ab \frac{k_H}{k_t} \frac{dH(t)}{dt}, \quad U(t) = 12U'(4t'), \quad (4)$$

где a, b – размеры исследуемого контура.

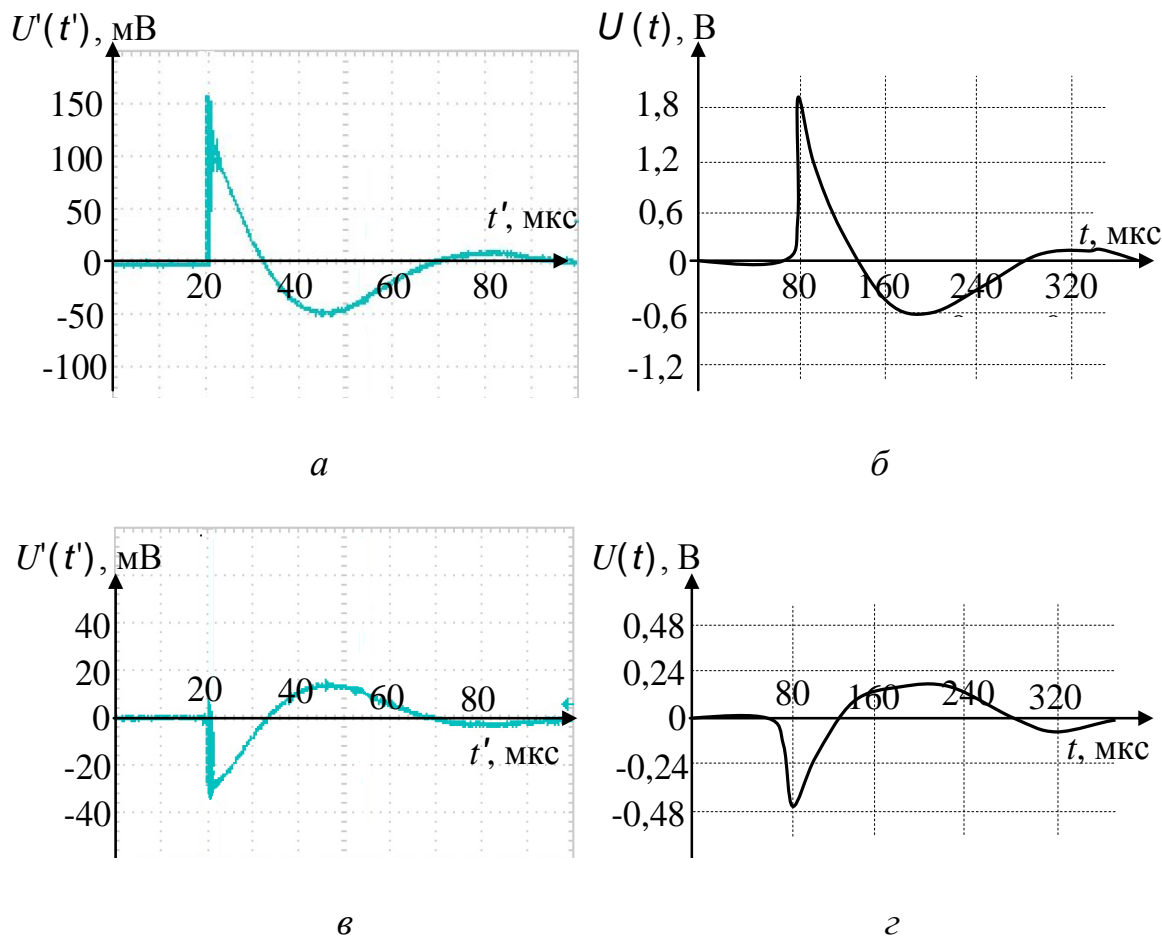


Рис. 4. Электромагнитная помеха в линиях связи БПЛА (а, б – соответственно, измеренное на масштабной модели и моделирование, вариант 1; в, з – соответственно, измеренное и моделирование, вариант 2)

8. Для прогнозирования помехоустойчивости бортовых электронных систем БПЛА необходимо провести сравнение параметров электромагнитных помех в линиях связи (в рассматриваемом примере энергия помехи может достигать 10^{-5} Дж)

с критическими значениями, приводящими к временному нарушению функционирования (табл. 2) или повреждению чувствительных элементов (табл. 3) [19, 20].

Таблица 2

Параметры основных семейств логических интегральных микросхем

Серия микросхем*	Напряжение питания (НП), В	Низкий уровень, В		Высокий уровень, В		Переключение, В	
		мин	макс	мин	макс	мин	макс
НВТТЛ	3,3±10%	-0,3	0,8	2,0	НП-0,3	1,2	3,3
GTL	1,2±5%		ОН-0,05	ОН-0,05		0,2	
HSTL	1,5±0,1	-0,3	ОН-0,1	ОН-0,05	НП-0,3	0,2	1,5
LVDS		0,9	1,1	1,5	1,7	0,4	0,8

*Обозначения в таблице: НВТТЛ – низковольтная транзисторно-транзисторная логика (с пониженным напряжением питания); GTL – низковольтная высокоскоростная логика; HSTL – высокоскоростная логика; LVDS – низковольтная передача дифференциальных сигналов; ОН – опорное напряжение.

На основе результатов сравнения можно сделать вывод об обеспечении помехоустойчивости бортовых электронных систем БПЛА к воздействию магнитного поля удаленного разряда молнии. При выявлении возможных нарушений помехоустойчивости бортовых электронных систем, в данном примере для БПЛА с фюзеляжем из неметаллических материалов, необходимо заранее

принимать известные и новые меры по снижению помех [4, 5, 21, 22, 23, 24, 25].

Таблица 3

Критические уровни энергии электромагнитных помех для элементов БПЛА

№ п/п	Наименование элемента	Значение энергии помехи, Дж
1	Интегральные микросхемы	$10^{-7}-10^{-3}$
2	Низко потенциальные интегральные микросхемы	10^{-5}
3	Маломощные транзисторы	$10^{-6}-10^{-3}$
4	Точечный контактный диод	$(0,01-12) \cdot 10^{-6}$
5	Микроволновые диоды	$10^{-7}-10^{-4}$
6	Электровоспламенительные устройства	$10^{-5}-10^{-4}$

Заключение

Таким образом, предложенный метод физического моделирования, математические модели, схема экспериментального стенда и расчетные параметры физических моделей составляют основу практической методики исследования помехоустойчивости бортовых электронных систем БПЛА при воздействии магнитного поля удаленного разряда молнии. Данный подход позволяет снизить сложность решения задачи анализа электромагнитных помех и заранее выявить возможные пути повышения помехоустойчивости БПЛА при воздействии данного типа источников помех.

В перспективе, на основе предложенной методики и математических моделей,

возможно применение физического моделирования для задач исследования помехоустойчивости БПЛА при воздействии других макроисточников электромагнитных помех, в том числе и преднамеренного характера.

Библиографический список

1. Журавлев В.Н., Журавлев П.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. № 4. С. 156 - 164.
2. Ляшева С.А., Медведев М.В., Шлеймович М.П. Распознавание объектов на местности в системах управления беспилотных летательных аппаратов // Известия Высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 3. С. 64 - 66.
3. Ляшева С.А., Медведев М.В., Шлеймович М.П. Вейвлет-сжатие изображений в системах управления беспилотных летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 218 - 221.
4. Комягин С.И. Основы методологии электромагнитной стойкости беспилотных летательных аппаратов. - М.: Изд-во МИЭМ, 2007. - 158 с.
5. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. - М.: Радио и связь, 1987. - 256 с.
6. Аверин С.В., Кириллов В.Ю., Машуков Е.В., Резников С.Б., Шевцов Д.А. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых кабелей беспилотных

летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 113 - 117.

7. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Жегов Н.А., Нгуен В.Х., Томилин М.М. Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49701>

8. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=46938>

9. Сенюшкин Н.С., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Л.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА // Молодой ученый. 2011. № 4. С. 59 - 61.

10. Piantini A., Janiszewski J.M., Borghetti A., Nucci C.A., Paolone M. A scale model for the study of the LEMP response of complex power distribution networks // IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 710 - 720.

11. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 1-2. С. 115 - 122.

12. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Методика физического моделирования воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 3 - 6.

13. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в беспилотном летательном аппарате при воздействии высоковольтной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений.

Авиационная техника. 2017. № 2. С. 119 - 125.

14. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М. Физическое моделирование преднамеренного электромагнитного воздействия на вычислительную технику через металлоконструкции здания // Информация и безопасность. 2017. № 3. С. 456 - 459.

15. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников // Радиотехника и электроника. 2018. № 1. С. 97 - 102.

16. Стреттон Дж.А. Теория электромагнетизма. - М.: Гостехиздат, 1948. - 541 с.

17. Schumacher C.R. Electrodynamic similitude and physical scale modeling of nondispersive targets // Journal of Applied Physics, 1987, vol. 62, no. 7, pp. 2616 - 2625.

18. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic, New Jersey, Prentice Hall, 2003, 766 p.

19. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. - М.: Группа ИДТ, 2007. - 616 с.

20. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журнал радиоэлектроники. 2013. №6. С. 16 - 21.

21. Гизатуллин З.М. Повышение эффективности экранирования металлических корпусов электронных средств // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 3. С. 37 - 43.

22. Гизатуллин З.М. Снижение электромагнитных помех в межсоединениях многослойных печатных плат // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 2. С. 199 - 205.

23. Газизов А.Т., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Разложение сверхкороткого импульса в структурах с лицевой связью // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. № 3. С. 70 - 75.

24. Белоусов А.О., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Экспериментальное подтверждение модельной фильтрации в многопроводной микрополосковой линии // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 51 - 54.

25. Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 124 - 128.