

УДК 621.391.82; 004.3

З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, М.С. Шкиндеров, А.О. Архипов

Моделирование искажения сигналов в микрополосковой линии со щелью в слое земли

Часто искажение информационных сигналов в печатных платах возникает из-за резонансных эффектов в межсоединениях. Одной из причин резонансных эффектов в межсоединениях печатной платы является наличие щелей в слое земли, которые присутствуют для подключения каких-либо элементов, разъемов и т.п. В работе предложен инструмент для численного моделирования и разработаны имитационные модели для исследования резонансных эффектов в микрополосковой линии со щелью в слое земли. Проведен анализ искажения информационных сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными и указывают на достаточную адекватность разработанных моделей. Показано уменьшение искажений с помощью шунтирующего конденсатора в щели.

Ключевые слова: вычислительная техника, печатная плата, микрополосковая линия, резонанс, слой земли, межсоединение, искажение сигнала, моделирование, эксперимент.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-13-17

Основной чертой развития вычислительной техники (ВТ) является повышение быстродействия. Это ставит перед разработчиками устройств, в основном выполненных на печатных платах (ПП) с микрополосковыми линиями передачи, ряд новых задач. Повышение частоты работы элементов ПП приводит к появлению «паразитных» параметров в топологических элементах (проводниках, экранах, шинах питания), а также в компонентах (индуктивность выводов и т.п.). Поэтому повышение быстродействия требует учета влияния конструкции ПП и особенности передачи сигналов в ней на общие показатели устройства [1, 2].

Основные задачи внутриаппаратурной электромагнитной совместимости (ЭМС), которые уже давно исследуются и учитываются при проектировании высокоскоростных ПП [1–3]: минимизация перекрестных помех; обеспечение согласования линий передач; устранение помех по шинам питания [4]; устранение «отрыва» заземления микросхемы; обеспечение минимальной задержки. Еще одним предметом, актуальным и требующим тщательного исследования, являются резонансные эффекты в микрополосковых линиях ПП [5].

Резонансные явления – это последовательность резонансов различных систем внутри ВТ, таких как межсоединения с реактивной нагрузкой, щели в ПП, щели между ПП и металлическим корпусом, провода, кабели, сам корпус и т.д. Резонансная связь возникает в области одной частоты или, чаще, серии дискретных частот. Таким образом, можно выделить основные причины возникновения резонансных явлений в межсоединениях ПП ВТ: наличие щелей в слое земли, которые присутствуют для подключения каких-либо элементов, разъемов и т.п. Если разъем расположен вблизи линии передачи, резонанс возникает при частотах, когда длина разъема кратна половине длины волны [5]; переходные отверстия между слоями ПП [6, 7]; резонанс металлического корпуса, который ведет себя как высококачественный объемный резонатор [2, 8]; паразит-

ное реактивное сопротивление элементов с сосредоточенными параметрами [1, 2]; расположенные вблизи ПП различные проводники (например, коаксиальные кабели, провода, механические крепления), которые не заземлены вообще или заземлены только в некоторых местах [4]. Также резонанс внутри металлического корпуса ВТ часто возникает при воздействии внешних широкополосных источников, например электростатического разряда, разряда молнии и др. [9–12].

Эти эффекты могут существенным образом влиять на искажение информационных сигналов [1, 3, 13], электромагнитное излучение от ПП [14–16] и другие не менее важные аспекты ЭМС. При длительности фронта цифрового сигнала менее 1 нс необходимо комплексное решение этих и ряда других задач. В противном случае разработчикам сложно рассчитывать на успех своего изделия. Конечным результатом решения этих задач является рациональная топология и компоновка элементов ПП ВТ.

Задача анализа резонансных эффектов в межсоединениях ПП стала широко обсуждаться в течение последнего времени, в основном в зарубежных симпозиумах и конференциях [2, 5–8]. Практически все эти материалы сводятся к констатации факта существования данных эффектов, содержат некоторые рекомендации по их уменьшению и предлагают экспериментальные подходы к анализу. Однако экспериментальные методы требуют наличия специального оборудования и условий (например, экранированные комнаты), которое не по средствам каждому исследователю или предприятию-изготовителю ВТ. В связи с этим возникает задача анализа резонансных эффектов в межсоединениях ПП ВТ путем математического моделирования.

Целью данной работы является разработка имитационных моделей и анализ искажения информационных сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов. При этом исследование резонансных эффектов ведется в широком диапазоне частот с высокой разрешающей способностью по

частоте, в результате чего снижается вероятность потери острых резонансных пиков. Для сравнения результатов моделирования используются известные данные, полученные для экспериментальных печатных плат [5]. Анализ искажения сигналов с субнаносекундными параметрами в микрополосковой линии представлен во временной области.

Методы и модели для исследования искажения сигналов в микрополосковой линии

В рамках данной работы были рассмотрены возможности программы Microwave Studio (MWS) фирмы Computer Simulation Technology [17]. Программа MWS использует метод конечного интегрирования. Данный метод позволяет автоматически выбирать оптимальные для данной задачи метод решения и способ разбиения. Для улучшения моделирования объемных структур произвольной геометрической формы также реализован метод аппроксимации для идеальных граничных условий. При этом геометрия задачи задается в виде входных данных.

Исследование резонансных эффектов в микрополосковой линии проводится с помощью численных моделей, имитирующих экспериментальные платы [5] (рис. 1). Параметры щели в слое земли: ширина 1 мм, длина 35, 50, 65, 80 мм. Во втором варианте исследования щель в слое земли (длина 80 мм) соединяется в середине шунтирующим конденсатором емкостью 100 пФ. Источник P1 и нагрузка P2 имеют сопротивление 50 Ом. В данных моделях также учитываются потери в проводниках и диэлектрическом основании.

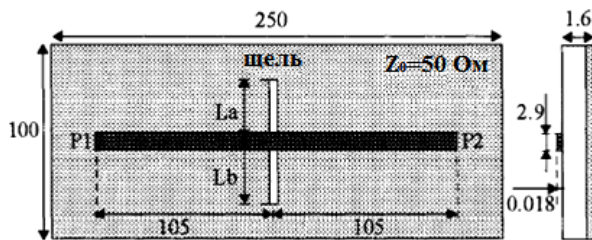


Рис. 1. Экспериментальная плата с микрополосковой линией передачи и поперечным щелевым резонатором в слое земли (все размеры в мм)

Имитационная модель, реализованная в MWS, представлена на рис. 2. Область исследования во всех численных моделях представляет собой прямоугольную область с открытыми границами.

Результаты исследования

При выполнении анализа резонансных эффектов в микрополосковой линии полученные результаты моделирования (рис. 3) сравниваются с результатами экспериментальных исследований (рис. 4) [5].

Полученные результаты исследования показывают, что если в слое земли микрополосковой линии присутствует щель, то коэффициент передачи $|S_{21}|$ на определенной полосе частот существенно уменьшается, и эти частоты зависят от длины щели. Предполагается, что это происходит из-за того, что обратный ток, протекающий вдоль плоскости земли, де-

лает обход вокруг щели, что вызывает задержку фазы. Таким образом, предложенный инструмент позволяет достаточно точно рассчитать параметры возникающих резонансных эффектов из-за наличия щели в слое земли тестовой структуры ПП.

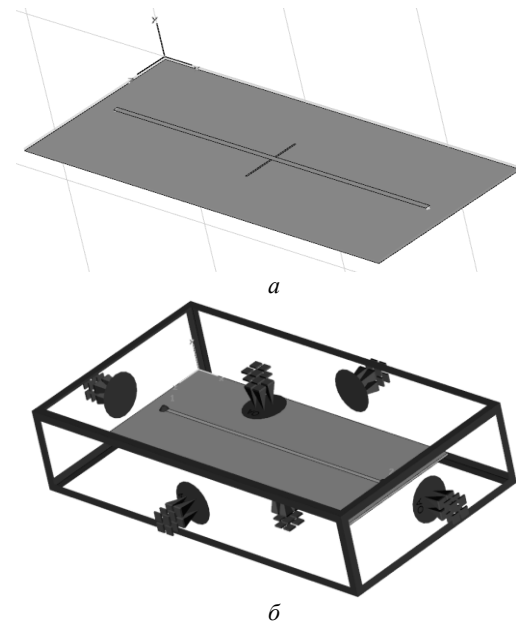


Рис. 2. Имитационная модель ПП (а) и конфигурация области исследования (б)

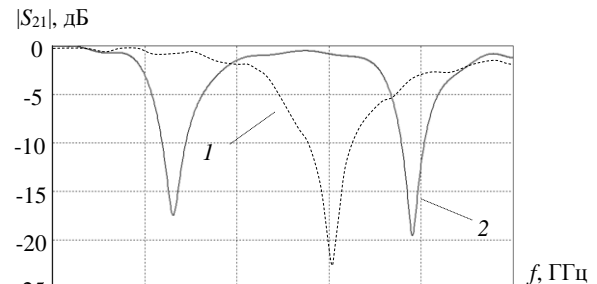


Рис. 3. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ при длине щели в слое земли: 1 – 35 мм; 2 – 80 мм

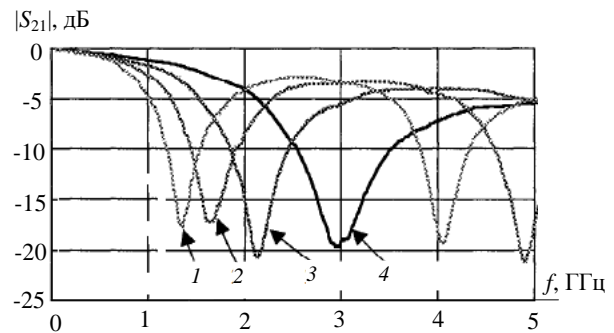


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ при длине щели в слое земли: 1 – 80 мм; 2 – 65 мм; 3 – 50 мм; 4 – 35 мм

Примеры результатов моделирования искажения сигнала в микрополосковой линии при отсутствии шунтирующего конденсатора, представлены на рис. 5–9.

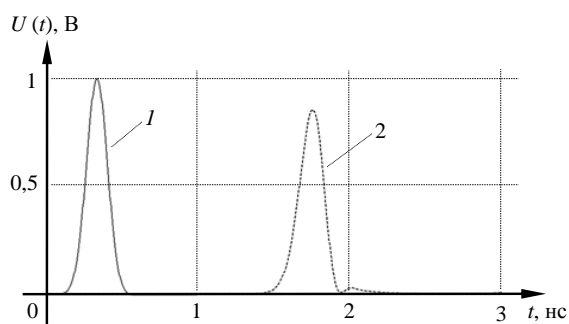


Рис. 5. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; без щели)

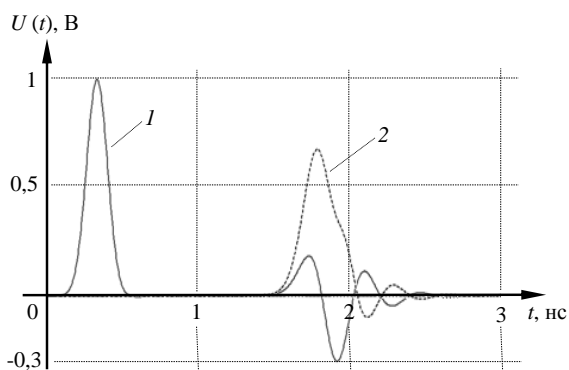


Рис. 6. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 35 мм)

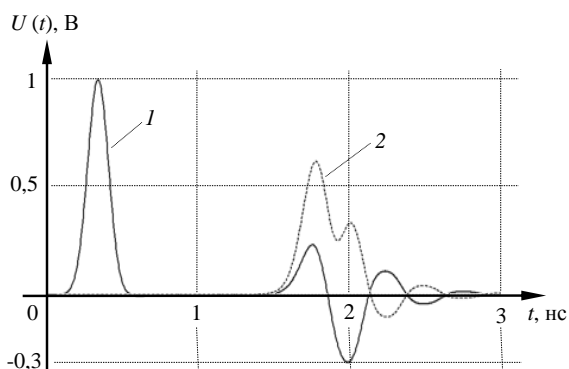


Рис. 7. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 50 мм)

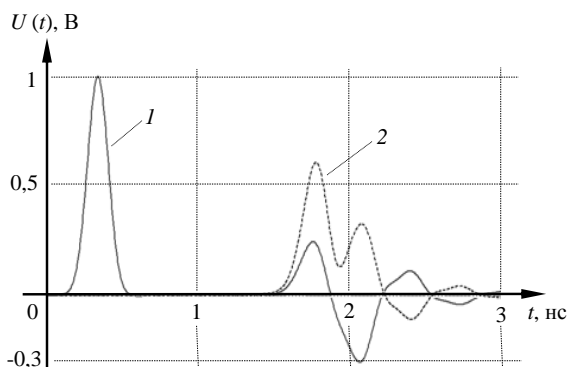


Рис. 8. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 65 мм)

Для случая, когда щель в слое земли соединяется в середине конденсатором емкостью 100 пФ, ре-

зультат моделирования информационного сигнала в микрополосковой линии представлен на рис. 10.

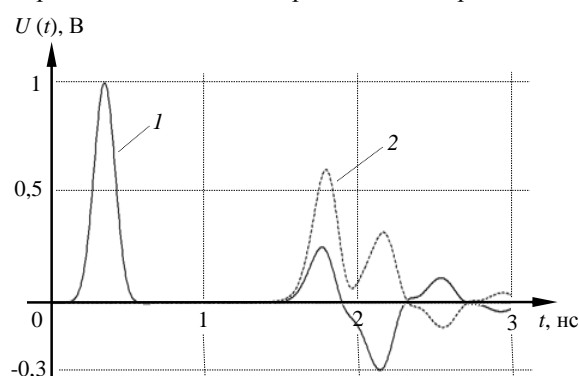


Рис. 9. Временная форма напряжения в микрополосковой линии (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 80 мм)

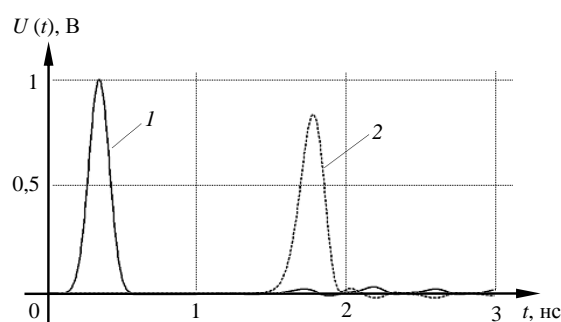


Рис. 10. Временная форма напряжения в микрополосковой линии при наличии шунтирующего конденсатора в щели в слое земли (1 – в начале; 2 – в конце; длина щели 80 мм)

Анализ информационных сигналов в межсоединениях показывает, что чем больше длина щели в слое заземления микрополосковой линии, тем больше влияние резонансных эффектов на его передачу. Это выражается в существенном снижении амплитуды сигнала и искажении формы. Примечательно и увеличение амплитуды отражения от щели, приходящее в начало линии.

Для снижения резонансных эффектов в межсоединениях ПП, связанных со щелями в слоях земли, можно ввести высокочастотные конденсаторы. В данном случае происходит ёмкостное шунтирование щелевого резонатора в середине. Это позволяет увести резонанс вверх по частоте и улучшить отклик тестовой структуры во временной области.

Заключение

С повышением быстродействия ВТ возникают задачи внутриаппаратурной ЭМС, связанные с возникновением резонансных эффектов в межсоединениях ПП, на базе которых, как правило, построены современные устройства. Наиболее эффективно данные задачи могут быть решены еще на этапе разработки ПП на основе результатов моделирования. В работе предложен инструмент для численного моделирования, программа Microwave Studio и разработаны имитационные модели для исследования искажения сигналов в микрополосковой линии из-за резонансных эффектов из-за щели в слое земли.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает достаточную согласованность, что позволяет авторам выразить уверенность в возможности использования данного инструмента для исследования ПП с более сложной структурой, а также для изучения электромагнитных излучений.

Литература

- Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с.
- Xing-Chang W. Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 322 p.
- Henry O.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 872 p.
- Кечиев Л.Н. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. – М.: Грифон, 2016. – 400 с.
- A study on the model of the slit on the ground plane / Y. Mizuguchi, H. Yamamoto, S. Shinohara, R. Sato // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Danvers, 2000. – P. 575–580.
- Tian X. Analysis of via resonance in multi-layer printed circuit board / X. Tian, Y. Zhang // Proceeding of 2018 International Workshop on Antenna Technology. – Nanjing, China, 2018. doi: 10.1109/IWAT.2018.8379234
- Effects of parasitic resonance on a vertical transition in multilayer printed circuit boards / S.T. Choi, K. Hamaguchi, K. Tokuda, Y. Kim // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2010. – No. 52. – P. 2098–2100.
- Williams T. Controlling resonances in PCB-chassis structures // Proceeding of International Symposium on EMC EUROPE–2002. – Sorrento, Italy, 2002. – P. 305–310.
- Гизатуллин З.М. Экспериментальные исследования помехоустойчивости персонального компьютера при импульсном разряде статического электричества / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 3. – С. 78–83.
- Кириллов В.Ю. Расчёт напряжённости электрического и магнитного полей от электростатических разрядов / В.Ю. Кириллов, М.М. Томилин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 2. – С. 15–24.
- Гизатуллин З.М. Анализ электромагнитной обстановки внутри зданий при воздействии разряда молнии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 1-2. – С. 38–47.
- Нуриев М.Г. Анализ помехоустойчивости вычислительной техники при воздействии разряда молнии на молниезащиту здания на основе физического моделирования / М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, В.А. Дроздилов, Э.И. Павлова // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 6. – С. 14.
- Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2. – С. 45–50.
- Funato H. Model-based analysis of screw locations to reduce radiation from a PCB-chassis structure / H. Funato, T. Suga, M. Suhara // Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – USA, Raleigh, 2014. – P. 123–127.
- Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 9. – С. 7.
- Куксенко С.П. Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100BASE-T / С.П. Куксенко, Р.Р. Хажибеков, Т.Т. Газизов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 1. – С. 13–20.
- CST Studio Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite> (дата обращения: 07.10.2019).

Гизатуллин Зиннур Марселевич

Д-р техн. наук, доцент, профессор каф. систем автоматизированного проектирования Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
ORCID: 0000-0003-0571-5593
Тел.: +7-903-061-71-76
Эл. почта: gzm_zinnur@mail.ru

Гизатуллин Рифнур Марселевич

Канд. техн. наук, инженер ПАО «Казаньоргсинтез», Беломорская ул., д. 101, г. Казань, Россия, 420051
Тел.: +7-906-329-14-48
Эл. почта: e-mail: grm444@mail.ru

Шкиндеров Максим Сергеевич

Аспирант каф. системы автоматизированного проектирования КНИТУ-КАИ
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
Тел.: +7-917-224-71-69
Эл. почта: shkinderov@rambler.ru

Архипов Артем Олегович

Студент каф. системы автоматизированного проектирования КНИТУ-КАИ
Карла Маркса ул., д. 10, г. Казань, Россия, 420111
Тел.: +7-937-615-73-80
Эл. почта: arkhiartem1998@icloud.com

Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M., Shkinderov M.S., Arkhipov A.O.

Simulation of signal distortion in a microstrip line with a gap in the ground layer

Often, the distortion of information signals in printed circuit boards occurs due to resonant effects in interconnects. One of the reasons for resonance effects in the interconnects of the printed circuit board is the presence of gaps in the ground layer, which are present for connecting any elements, connectors, etc. A tool for numerical modeling is proposed and simulation models are developed for studying resonance effects in a microstrip line with a gap in the ground layer. The analysis of distortion of information signals in the microstrip line due to resonance effects is carried out. The simulation results are compared with experimental data and indicate that the models developed are sufficiently adequate. It is shown a reduction in distortion using a shunt capacitor in the slit.

Keywords: computing equipment, printed circuit board, microstrip line, resonance, grounding layer, interconnection, signal distortion, simulation, experiment.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-13-17

References

1. Kechiev L.N. *Pechatnye platy i uzly gigabitnoy elektroniki* [Printed circuit boards and nodes gigabit electronics]. M., Grifon Publ., 2017, 424 p. (in Russ.).
2. Xing-Chang W. *Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 322 p.
3. Henry O.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 872 p.
4. Kechiev L.N. *Proektirovanie sistemy raspredeleniya pitaniya pechatnykh uzlov elektronnoy apparatury* [Designing a power distribution system for printed circuit assemblies of electronic equipment]. M., Grifon Publ., 2016, 400 p. (in Russ.).
5. Mizuguchi Y., Yamamoto H., Shinohara S., Sato R.A. study on the model of the slit on the ground plane. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings*, USA, Danvers, 2000, pp. 575–580.
6. Tian X., Zhang Y. Analysis of via resonance in multi-layer printed circuit board. *2018 International Workshop on Antenna Technology Proceedings*, Nanjing, China, 2018. doi: 10.1109/IWAT.2018.8379234
7. Choi S.T., Hamaguchi K., Tokuda K., Kim Y.H. Effects of parasitic resonance on a vertical transition in multi-layer printed circuit boards. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2010, no. 52, pp. 2098–2100.
8. Williams T. Controlling resonances in PCB-chassis structures. *International Symposium on EMC EUROPE 2002 Proceedings*, Italy, Sorrento, 2002, pp. 305–310.
9. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Experimental studies of the noise immunity of a personal computer in a pulsed discharge of static electricity. *Vestnik Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, 2011, no. 3, pp. 78–83 (in Russ.).
10. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. Calculation of the electric and magnetic fields voltage from electrostatic discharges. *Electromagnetic Compatibility Technologies*, 2017, no. 2, pp. 15–24. (in Russ.).
11. Gizatullin Z.M. Analysis of the electromagnetic environment inside buildings under the influence of a lightning discharge. *News of higher educational institutions. Energy problems*, 2008, no. 1-2, pp. 38–47 (in Russ.).
12. Nuriev M.G., Gizatullin R.M., Drozdikov V.A., Pavlova E.I. Analysis of the noise immunity of computer equipment under exposure to the lightning discharge on the lightning protection of a building on the basis of physical modeling. *Journal of Radio Electronics*, 2019, no. 6, pp. 14 (in Russ.).
13. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozerov A.O., Gazizov T.R. New features of the system for modeling electromagnetic compatibility TALGAT. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 2, pp. 45–50 (in Russ.).
14. Funato H., Suga T., Suhara M. Model-based analysis of screw locations to reduce radiation from a PCB-chassis structure. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings*, USA, Raleigh, 2014, pp. 123–127.
15. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Shkinderov M.S., Nazmetdinov F.R. A simple method of research of electromagnetic radiation from electronic means. *Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 9, p. 7 (in Russ.).
16. Kuksenko S.P., Khazhibekov R.R., Gazizov T.T. Evaluation of the level of radiated electromagnetic emission of a seven-cascade modal filter for Ethernet 100BASE-T. *Electromagnetic Compatibility Technologies*, 2017, no. 1, pp. 13–20 (in Russ.).
17. CST Studio Suite. Available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite> (Accessed: October 7, 2019).

Zinnur M. Gizatullin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Department of Computer Aided Design Systems,
Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev – KAI (KNRTU-KAI)
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
ORCID: 0000-0003-0571-5593
Phone: +7-903-061-71-76
Email: gzm_zinnur@mail.ru

Rifnur M. Gizatullin

Candidate of Engineering Science, Engineer,
PJSC Kazanorgsintez
101, Belomorskaya st., Kazan, Russian Federation, 420051
Phone: +7-906-329-14-48
Email: grm444@mail.ru

Maksim S. Shkinderov

PhD student, Department of Computer Aided Design Systems,
KNRTU-KAI
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
Phone: +7-917-224-71-69
Email: shkinderov@rambler.ru

Artem O. Arkhipov

Student, Department of Computer Aided Design Systems,
KNRTU-KAI
10, Karl Marx st., Kazan, Russian Federation, 420111
Phone: +7-937-615-73-80
Email: arkhiartem1998@icloud.com