

Международная академия наук высшей школы  
Академия наук высшей школы Российской Федерации  
Сибирская академия наук высшей школы  
Бурятский, Красноярский, Кузбасский, Новосибирский,  
Омский, Томский научные центры САН ВШ  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

# **Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-27-2021)**

27-я международная  
научно-практическая конференция

16 ноября 2021 г.  
г. Томск, Россия

**ДОКЛАДЫ**  
(материалы конференции)

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2021

**ПЛЕНАРНЫЕ  
ДОКЛАДЫ**

М. Е. КОМНАТНОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
ТУСУР, Томск

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ  
НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЦЕПТОРОВ  
И ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ПРОИЗВОЛЬНО  
РАСПОЛОЖЕННЫХ И ЧАСТИЧНО ЗАМКНУТЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ БАРЬЕРОВ**

Кратко рассмотрены основные результаты одноимённого проекта Российского научного фонда, выполняемого в ТУСУРе. Описано создание объектов и устройств для исследования электромагнитных эмиссий и восприимчивости, в том числе для совместных климатических и электромагнитных воздействий. Представлены результаты разработки методик измерения электромагнитной эмиссии и восприимчивости объекта при климатическом воздействии, а также методов, моделей и устройства для вычисления и измерения экранирующих свойств электромагнитных барьеров. Приведены предварительные результаты по выявлению взаимовлияния источника и рецептора вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров.

Совершенствование электрорадиоизделий (ЭРИ) за счёт миниатюризации и интеграции позволило сделать устройства мобильными, широкофункциональными, энергоэффективными и универсальными. С момента выявления проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) стало понятно, что её учёт необходим на всех стадиях жизненного цикла радиоэлектронной продукции. При этом научно-технический прогресс ещё больше актуализировал данную проблему, поскольку без её изучения и решения работа современных систем и устройств, содержащих радиоэлектронные средства (РЭС), практически невозможна. Поэтому совершенствование и создание новых методов и устройств в области ЭМС способствует модернизации и разработке более совершенной радиоэлектронной продукции.

Последние тенденции в решении проблемы ЭМС РЭС можно связать с проведением комплексных исследований, включающих длительные наблюдения, служащие основой для понимания и выделения кратковременных колебаний и долгосрочных событий при изучении и освоении космического и воздушного пространства Арктики и Антарктики. Применяемое для решения данных задач современное научно-исследовательское оборудование включает множество разнообразных РЭС, круглогодичная работа которых является необходимым условием обеспечения жизнедеятельности человека и надежного функционирования оборудования. Нормальный режим работы РЭС в сложных условиях поддерживается за счет различных методов, с помощью которых сохраняются основные технические характеристики ЭРИ в пределах заданного диапазона. Например, в Сибири разница температур может достигать 90 °С, что оказывает влияние на параметры ЭРИ, в том числе на вольт-амперные характеристики полупроводниковых изделий [1]. В результате изменяются амплитуды полезных и помеховых сигналов, нарушая устойчивую работу РЭС в целом. Таким образом, необходимо решение данной проблемы, учитывая реальные условия эксплуатации РЭС, что позволит повысить их надежность и отказоустойчивость.

Проект Российского научного фонда № 19-79-10162, выполняемый в 2019–2022 гг. в ТУСУРе, направлен на решение ряда задач в рамках указанной проблемы. В проекте предусмотрены следующие этапы.

1. Создание измерительной оснастки и объектов, подвергающихся воздействию.

2. Создание устройств на основе линий передачи для исследования электромагнитных эмиссий и восприимчивости объектов.

3. Разработка устройств для совместных климатических и электромагнитных воздействий.

4. Разработка методик и с их помощью измерение электромагнитной эмиссии и восприимчивости объекта при климатическом воздействии.

5. Выявление взаимовлияния источника и рецептора вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров в заданных климатических условиях.

6. Разработка методов, моделей и устройства для вычисления и измерения экранирующих свойств электромагнитных барьеров.

Прежде всего были выбраны и обоснованы объекты для исследования на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Созданы модели различных линий передачи (копланарной и микрополосковой) и проанализированы их параметры для выявления взаимовлияний геометрии, структуры, электромагнитного и температурного воздействий. Далее разработаны и созданы измерительные печатные платы (ПП) с линиями передачи и на их основе Г-, П- и Т-образные фильтры, а также ПП для трёх интегральных схем (ИС) на базе ядра ARM Cortex M3 зарубежного и отечественного производства, применяемых в критических РЭС, таких как кардиостимуляторы [2].

На основе ранее разработанной методики [3] созданы экспериментальные образцы uTEM- и STEM-камер. Первая предназначена для исследования и испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС высотой не более 5 мм в диапазоне частот до 5,3 ГГц со значением модуля коэффициента отражения  $|S_{11}| \leq -17$  дБ [4, 5]. Вторая позволяет проводить измерения S-параметров, на основе которых вычисляется эффективность экранирования (ЭЭ) различных композитных материалов в диапазоне частот до 12 ГГц с  $|S_{11}| \leq -13$  дБ [5–7].

Для совместных климатических и электромагнитных воздействий разработана климатическая электромагнитная реверберационная камера (РК), в основу которой заложена климатическая экранированная камера [3, 8]. Для этого на основе алгоритма [9] разработана и программно реализована группа моделей, позволяющих вычислить распределение электрического и температурного полей в эффективной рабочей зоне в зависимости от электрических и геометрических параметров РК. В результате получены геометрические размеры РК и испытательной зоны внутри неё, которые соответствуют современным стандартам испытаний при незначительном превышении требуемого значения среднеквадратического отклонения на ряде частот. Разработан терморегулятор с поддержкой многофазного режима работы для равномерного локального нагрева или охлаждения внешних стенок камеры [10] и способ синхронизации для терморегулятора [11, 12], позволяющий выполнять общую задачу группой микро-

контроллеров (МК) для создания совместных климатических и электромагнитных воздействий. Разработаны структурная схема, эскизный проект и внешний облик климатической электромагнитной РК. Камера предназначена для изучения помехоэмиссии и помехоустойчивости крупногабаритных объектов при контролируемых климатических воздействиях на них.

Разработаны методики измерения с использованием созданных ТЕМ- [2], uТЕМ- и СТЕМ-камер, а также измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС при климатическом воздействии. Выполнены измерения частотных зависимостей уровня эмиссии и  $S$ -параметров исследуемых объектов в uТЕМ-камере при воздействии на них температуры от минус 50 до +150 °С в промышленной температурной камере. Оценено влияние электромагнитного и климатического воздействий на электрические параметры объектов. Определены максимальные значения уровней помехоэмиссии и изменения частотных зависимостей  $S$ -параметров при воздействии температуры на uТЕМ-камеру с линиями передачи и фильтрами. Получены оценки уровня излучаемой помехоэмиссии при различных типах источника питания [13] и режимах работы отечественных и зарубежного микроконтроллеров (МК). Выявлен рост уровня помехоэмиссии вблизи основной частоты тактирования и кратной ей гармоники, амплитуды которых значительно зависят от температуры МК [14]. Предложены методы и алгоритмы восстановления и программной защиты в случае возникновения сбоев в процессе исследования МК на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Выполнены измерения  $S$ -параметров в СТЕМ-камере и на их основе получены частотные зависимости ЭЭ композитных и радиопоглощающих материалов. С применением ТЕМ-камеры [3] и специально созданной оснастки собрана DualТЕМ-камера, при помощи которой проведены измерения ЭЭ разнотипных материалов, включая металлическую фольгу и радиоткани. На основе данных измерений разработан и предложен способ для электромагнитного экранирования радиотканью элементов и узлов, расположенных на ПП РЭС.

Проведен анализ взаимовлияния геометрических параметров и свойств диэлектрической и металлической пластин, расположенных между источником и рецептором, при разных расстояниях и расположении. Показано, что с увеличением

диэлектрической проницаемости пластины, расположенной между источником и рецептором, существенно изменяется форма сигнала на рецепторе при незначительном изменении его амплитуды. Исследовано воздействие на рецептор, расположенный за экранирующим корпусом, электромагнитного излучения источника, расположенного внутри корпуса. Установлено, что экранирующие конструкции оказывают существенное влияние на амплитуду напряжения, наводимого на близко расположенные рецепторы. Выполнено исследование влияния геометрических параметров рецептора и источника электромагнитного поля на характеристики рецептора. На основании этого разработана модель, описывающая источник и рецептор как пару несимметричных вибраторных антенн, разделенных электромагнитным барьером в виде металлической пластины и расположенных на ПП внутри uTEM-камеры. Проведено сравнение частотных зависимостей  $S$ -параметров, полученных при помощи электродинамического моделирования и измерений, показавшее их корректность. Выявлены закономерности влияния геометрических параметров источника и рецептора электромагнитного поля на характеристики рецептора в комплексной системе электромагнитных экранов. Описаны результаты исследования взаимосвязи источника и рецептора в комплексной системе электромагнитных экранов, состоящей из двух частично замкнутых экранирующих корпусов. Создан алгоритм расчета напряженности электрического поля в произвольной точке внутри экранирующей системы. Выполнен анализ комплексной системы экранов при различных вариантах расположения вложенного корпуса и его апертуры. Приведены наихудший и наилучший варианты конструкций комплексной системы электромагнитных экранов. Разработаны и предложены модели систем электромагнитных экранов, обеспечивающих наихудшую и наилучшую помехозащищенность при размещении рецептора или источника электромагнитного излучения во вложенном малогабаритном корпусе. Разработана методика анализа помехоэмиссии в комплексной системе электромагнитных экранов. Сформулированы основные закономерности изменения помехоэмиссии от заданного источника излучения при его размещении в комплексной системе электромагнитных экранов.

Проведена оценка и представлены частотные зависимости ЭЭ типовых частично замкнутых электромагнитных барьеров с учетом влияния диэлектрических и радиопоглощающих материалов, расположенных внутри, снаружи и в апертурах электромагнитных барьеров [15]. С целью снижения уровня электромагнитной эмиссии источника и восприимчивости рецептора разработан ряд моделей и методов для оценки экранирующих свойств типовых конструкций, которые позволяют вычислить ЭЭ корпусов различных геометрических размеров, а также с разной формой и количеством электромагнитных барьеров, расположенных внутри, снаружи и в апертурах экранирующего корпуса [16–20]. Разработана методика оценки ЭЭ типовых экранирующих корпусов на основе  $S$ -параметров, измеренных без внесения в полость экранирующего корпуса рецептора или источника ЭМП, отличающаяся возможностью учета высших типов волн, распространяющихся в корпусе. На основе методики разработаны эскизный проект и облик устройства для косвенного измерения ЭЭ металлических корпусов [15].

В настоящее время по результатам проекта опубликовано 35 работ, из них 11 в изданиях, индексируемых WoS и Scopus, одна в журнале, входящем в Q1 Scopus, один патент на изобретение. Материалы по выявленным закономерностям взаимовлияния источника и рецептора электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров в заданных климатических условиях будут опубликованы после завершения проекта (май 2022 г.). Также на завершающей стадии проекта будут представлены результаты исследования воздействия электромагнитного излучения при заданных климатических условиях, а именно при влиянии влажности воздуха на исследуемые объекты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-79-10162) в ТУСУРе.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комнатнов, М.Е., Газизов, Т.Р. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры // Доклады ТУСУР. 2014. № 4(34), ч. 1. С. 39–45.
2. Busygina, A. Methods for ensuring the sustainability of pacemakers // Proc. of IEEE 2019 Int. multi-conference on engineering, computer



and information sciences (SIBIRCON), 2019, Novosibirsk, Russia, 21–27 Oct. 2019. P. 1–5.

3. Комнатнов, М.Е. Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07, 05.12.04. Томск, 2016. 216 с. URL: <https://storage.tusur.ru/files/43698/dissertation.pdf>.

4. Demakov, A.V., Komnatnov, M.E. TEM cell for testing low-profile integrated circuits for EMC // IEEE 21th Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, Chemal, Russia, 29 June – 3 July 2020. P. 154–158.

5. Демаков, А.В. Совершенствование камер для испытаний на электромагнитную совместимость: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. Томск, 2019. 155 с. URL: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/asd36c2l>.

6. Demakov, A.V., Komnatnov, M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials // IOP conf. series: materials science and eng. 2020. Vol. 734, N 1 012077, P. 1–5. doi:10.1088/1757-899X/734/1/012077.

7. Заявка 2020131978 Рос. Федерация. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Иванов А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р. № 2020131978; заявл. 29.09.20; опубли. 23.06.21.

8. Пат. 2558706 Рос. Федерация. Климатическая экранированная камера / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. № 2014103639/07; заявл. 03.02.14; опубли. 08.07.15, Бюл. № 22.

9. Demakov, A.V., Komnatnov, M.E. Algorithm for an estimation of the electromagnetic field uniformity in the working volume of a reverberation chamber // IEEE 21th Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2019. P. 65–69.

10. Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополнительным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры / А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 323–341.

11. Способ синхронизации группы разнотипных микроконтроллеров с управлением временем синхронной работы / А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 51–63.

12. Dubreuil, V., Osintsev, A.V. Designing multiple PID controllers based on an FPGA for controlling the temperature of TEM-cell surfaces // Proc. of IEEE 2019 Int. multi-conference on eng., computer and information sciences (SIBIRCON), 2019, Novosibirsk, Russia, 21–27 Oct. 2019. P. 194–198.

13. Research of radiated emissions of a microcontroller using various power supplies / A.V. Demakov, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // 2021 Int. siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazan, Russia 13–15 May 2021. – P. 1–4.

14. Measurement of microcontroller radiated emissions at different operation modes / A.V. Demakov, A.V. Osintsev, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov // IEEE 21th Int. Conf. on micro/nanotechnologies and electron devices EDM, Souzga, the Altai Republic, Russia 30 June – 4 July 2021. P. 1–5.

15. Иванов, А.А. Методы, программы и устройство для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств: дис. ... канд. техн. наук: 2.2.13. Томск, 2021. 182 с. URL: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/3q9chivd>.

16. Ivanov, A.A., Komnatnov, M.E., Gazizov, T.R. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2020, Oct. Vol. 62. Iss. 5. P. 2307–2310.

17. Ivanov, A.A., Komnatnov, M.E. Analytical model of a shielding enclosure populated with arbitrary shaped dielectric obstacles // Journal of physics: conf. series. 2021. Vol. 1889. P. 1–6.

18. Ivanov, A.A., Komnatnov, M.E. Model for estimating the shielding effectiveness of an enclosure with a perforated wall // IOP conf. series: materials science and engineering. 2020. Vol. 734. P. 1–6.

19. Ivanov, A.A., Komnatnov, M.E. Analytical model for estimating the shielding effectiveness of cylindrical connectors // IOP conf. series: materials science and engineering. 2019. Vol. 560. P. 1–6.

20. Иванов, А.А., Комнатнов, М.Е. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 1. С. 16–23.

M. E. Komnatnov

**The effect of temperature and humidity on the interaction of receptors and sources of electromagnetic radiation near arbitrarily located and partially closed electromagnetic barriers**

In this paper, the main results of the project of the same name of the Russian Scientific Foundation carried out in TUSUR, are briefly discusses. The creation of objects and devices for the study of electromagnetic emissions and susceptibility, including for joint climatic and electromagnetic influences, is described. The results of the development of methods for measuring electromagnetic emission and the susceptibility of an object under climatic influence, as well as methods, models and devices for calculating and measuring the shielding properties of electromagnetic barriers are presented. Preliminary results on the identification of the mutual influence of the source and the receptor near arbitrarily located and partially closed electromagnetic barriers are described.

maxmek@mail.ru