

УДК 621.396.41

А.Е. Корнев, В.А. Пономарев, М.Е. Юнеман, А.О. Белоусов

Защита критичных радиоэлектронных средств в составе беспилотного летательного аппарата JMT F550 6-Aix при воздействии СШП-помехи

Рассмотрен беспилотный летательный аппарат (БПЛА) JMT F550 6-Aix. Составлена структурная схема РЭС в составе данного БПЛА и оценены пути распространения кондуктивных помех. Выполнено моделирование меандровой линии с двумя отдельными витками, модального фильтра на основе 4-проводной кабельной структуры, а также экранирующего корпуса для защиты критичных элементов РЭС от воздействия мощной СШП-помехи. Выполнены анализ и оценка эффективности такой защиты.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, электромагнитная совместимость, модальный фильтр, защитные кабели, меандровая линия, экранирование.

В настоящее время существует тенденция применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в самых различных областях жизнедеятельности человека [1]. Они находят применение как в гражданской области (лесная и нефтегазовая промышленность, киноиндустрия, картография, мониторинг и др.), так и в военных целях. Так, вооруженные силы большинства развитых стран применяют ресурсы БПЛА для самых различных целей: видео- и фотосъемки, мониторинга, ретрансляции радиосигналов, доставки, разведки, наведения, нанесения урона при ведении боевых действий и др.

Ввиду широких возможностей БПЛА многие страны разрабатывают и принимают на вооружение не только их комплексы, но и различные средства противодействия им (что имеет стратегический характер), например, средства функционального поражения электромагнитным импульсом (ФП ЭМИ). Между тем эффективность средств ФП ЭМИ напрямую зависит от знания конкретных характеристик и элементов радиоэлектронных средств (РЭС) в составе конкретного БПЛА [2]. Знание характеристик и особенностей реальных средств ФП ЭМИ позволит принимать опережающие и своевременные решения, что может стать серьезным подспорьем во время реальных боевых действий [3].

Поэтому актуально обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) средств ФП ЭМИ с другими РЭС в составе комплекса противодействия БПЛА, в частном случае, «своими» БПЛА, которые могут находиться в области поражения средств ФП ЭМИ [3]. Для этого предлагается выбор конкретного БПЛА и РЭС в его составе, оценка путей распространения кондуктивных помех по цепям РЭС, а также повышение защитных характеристик выбранных РЭС при воздействии СШП-помехи посредством использования ряда подходов к обеспечению ЭМС. Цель работы – выполнить такое исследование.

Беспилотный летательный аппарат

В данной работе уделено внимание роторным БПЛА. В рамках выполняемых работ по проекту РНФ 22-29-01331 рассматривался широкий ряд БПЛА, среди которых выбирался наиболее подходящий (по габаритам, максимальной взлетной массе,

степени доступа к информации по компонентам РЭС и др.). В данной работе рассмотрено 2 БПЛА роторного типа, один из которых выбран для дальнейшей работы. Первый – DJI Phantom 3 как наиболее популярный вид БПЛА с закрытым корпусом, а второй – JMT F550 6-Aix. Рассмотрим БПЛА роторного типа DJI Phantom 3 [4].



Рис. 1. DJI Phantom 3

DJI Phantom 3 изготовлен из ударопрочного жёсткого пластика и металла. Длина и ширина БПЛА составляет 300 мм, а высота – 160 мм. Масса БПЛА в сборе составляет 1216 г, а максимальная взлетная масса, заявленная производителем, составляет 1500 г. Так, полезная нагрузка (с учетом установленной камеры) не превышает 200 г. Под полезной нагрузкой понимается максимальная масса, которую возможно использовать для монтажа / установки дополнительного оборудования без ухудшения летно-технических характеристик БПЛА. Тем не менее, подобные модели БПЛА отличает плотная компоновка РЭС в корпусе, что затрудняет монтаж защитных устройств без нарушения заявленной производителем конструкции БПЛА. С учетом этого в данном БПЛА будет затруднительно реализовать все возможные технические решения, нацеленные на повышение защитных характеристик при воздействии СШП-помех. Рассмотрим БПЛА JMT F550 6-Aix, представленный на рис. 2 [5].



Рис. 2. JMT F550 6-Aix

Данный БПЛА имеет ряд достоинств в отличие от рассмотренного ранее. Так, в полном сборе БПЛА его длина, ширина и высота составляют 600, 530, 240 мм соответственно. Масса – 700 г, а максимальная взлетная масса варьируется от 1400 до 1600 г (следовательно, полезная нагрузка составляет 700–900 г). При этом БПЛА оснащен многоярусным корпусом открытого типа, что открывает возможность установки дополнительных защитных устройств. Таким образом, в качестве БПЛА для дальнейшей работы выбран JMT F550 6-Aix [5].

Радиоэлектронные средства в составе выбранного беспилотного летательного аппарата

В БПЛА JMT F550 6-Aix используется широкий ряд РЭС: видеопередатчик, сервопривод камеры, регуляторы оборотов двигателей, оптический датчик потока воздуха, светодиодные системы и др. Помимо этого, существуют основные системы, отвечающие за непосредственное выполнение целевого назначения БПЛА: полетный контроллер, радиоприемник, GPS-модуль, регулятор напряжения и аккумулятор (рис. 3). Эти системы принимают непосредственное участие в питании, управлении, навигации и контроле БПЛА.

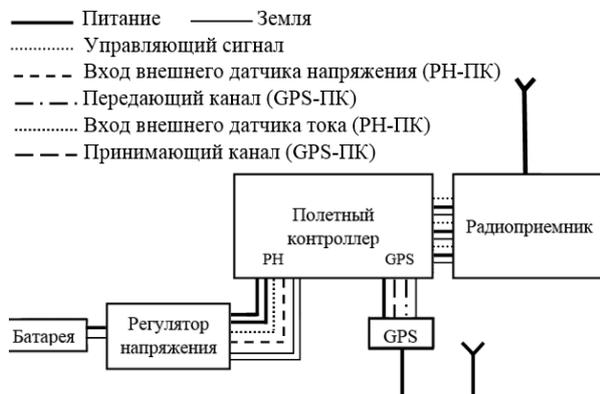


Рис. 3. Структурная схема основных РЭС БПЛА JMT F550 6-Aix с маркировкой кабелей

Из рис. 3 видно, что помимо основных РЭС в составе БПЛА также обозначены основные кабельные соединения данных РЭС. Знание параметров и типов применяемых кабелей открывает возможность

их замены (с сохранением характеристик полезного сигнала) на защитные структуры, предназначенные для защиты от возможной СШП-помехи.

В качестве примера критичного РЭС рассмотрим GPS-модуль. В случае воздействия на него СШП-помехи возможна деградация внутренних компонентов РЭС, потеря контроля над БПЛА и, как следствие, его потеря. Рассмотрим используемый GPS-модуль LEA-6H [6]. Он отвечает за определение местоположения, ориентации и перемещения БПЛА в пространстве, обеспечивает точность и надежность навигационных данных, что необходимо для выполнения ряда задач в том числе наблюдения, контроля, поиска и др. (рис. 4) [3]. GPS-модуль оснащен выносной антенной (152 мм), а его рабочее напряжение составляет 3,3 В.



Рис. 4. GPS модуль LEA-6H

Применение подходов к обеспечению ЭМС для защиты GPS-модуля беспилотного летательного аппарата от воздействия СШП-помехи

В результате анализа используемого GPS-модуля в составе JMT F550 6-Aix предложены дальнейшие подходы для обеспечения ЭМС в задаче защиты от СШП-помехи. Так, предложена структурная схема РЭС в составе БПЛА JMT F550 6-Aix с учетом использования модальных фильтров (МФ) на основе полосковых структур (рис. 5).

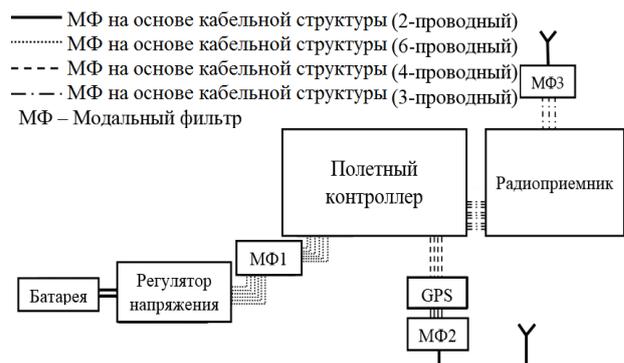


Рис. 5. Структурная схема БПЛА JMT F550 6-Aix с учетом защитных устройств

Кроме этого, для дополнительной защиты от воздействия СШП-помехи предложено заменить используемые провода и кабели на МФ на основе кабельных структур посредством изменения расположения отдельных проводов и/или их объединения в единую изоляцию.

Кроме этого, для предотвращения вероятности перекрестных наводок, а также воздействия излучаемой СШП-помехи непосредственно на применяемые МФ предлагается их экранирование за счет использования корпусов (МФ на основе полосковых структур) и материалов по типу экранирующих лент/оплеток или фольги (МФ на основе кабельных структур).

Из рис. 5 видно, что между критичными элементами РЭС предлагается добавление МФ на основе полосковых и кабельных структур. Так, расположение МФ1 предполагает защиту полетного контроллера от СШП-помехи, поступающей со стороны регулятора напряжения. МФ2 и 3, в свою очередь, устанавливаются после антенн, выступающих в роли основного рецептора наводимых помех. МФ1-3 выполнены в виде полосковых структур. Также видно применение в составе структурной схемы 2-, 3-, 4- и 6-проводных МФ на основе кабельных структур. В качестве примера полоскового МФ рассмотрим МФ2, призванный защитить GPS-модуль от поступающей со стороны антенны кондуктивной СШП-помехи.

Моделирование модального фильтра на основе меандровой микрополосковой линии с двумя отдельными витками

Моделирование проводилось в системе квазистатического анализа TALGAT [7] с учетом потерь в проводниках и диэлектрике. МФ2 представляет собой меандровую МПЛ с двумя отдельными витками. Поперечное сечение МФ2 в экранирующем корпусе представлено на рис. 6.

Выполнена оптимизация посредством эвристического поиска по амплитудному и временным критериям для уменьшения уровня СШП-помехи на выходе МФ. Параметры, получившиеся в результате оптимизации: $w = 300$ мкм, $s_1 = 220$ мкм, $s_2 = 450$ мкм, $s_3 = 640$ мкм, $t = 35$ мкм, $d_1 = 900$ мкм, $d_2 = 1500$ мкм, $h_1 = 200$ мкм, $h_2 = 1635$ мкм, $l = 1200$ мм, $\epsilon_{r1} = 1$.

В качестве подложки выбран композитный материал Arlon AD 1000 со значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 10$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,025$.

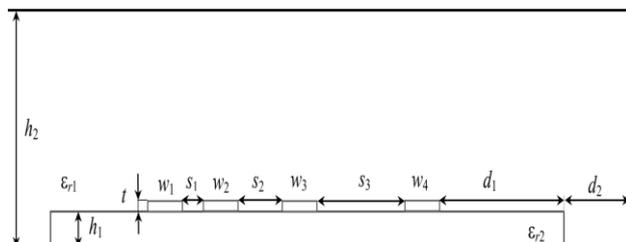


Рис. 6. Поперечное сечение МФ на основе меандровой МПЛ с двумя отдельными витками

Эквивалентная схема МФ представлена на рис. 7. Длина МФ принята $l = 1,2$ м (МФ2), а значения R_{Γ} , R_H и R – по 50 Ом. Параметры воздействующей СШП-помехи приняты следующими: амплитуда ЭДС 500 В, длительности фронта, спада и плоской вершины по 42, 30 и 4 пс (по уровням 0,1–0,9), так что общая длительность (по уровню 0,5) – 60 пс [8, 12]. На рис. 8 представлены формы напряжений на выходе МФ2, подключаемого между GPS-модулем и антенной.

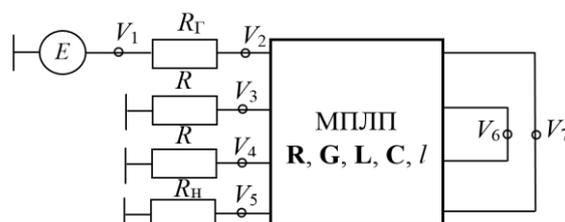


Рис. 7. Эквивалентная схема МФ на основе меандровой МПЛ с двумя отдельными витками

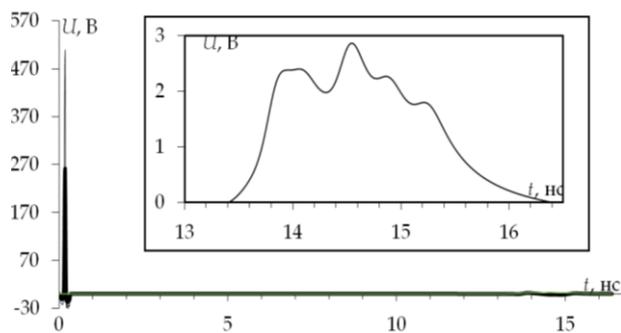


Рис. 8. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) МФ2

Из рис. 8 видно, что воздействующую СШП-помеху (250 В) удалось ослабить до 2,86 В. Так, максимальное напряжение на выходе МФ2 не превышает максимальное входное напряжение GPS-модуля (3,3 В). На выходе МФ наблюдается последовательность частично наложенных друг на друга импульсов разложения.

Это связано с тем, что разница погонных задержек ближайших импульсов разложения меньше длительности воздействующего импульса. Также это объясняется влиянием дисперсии и потерь в линии передачи. Тем не менее в результате использования МФ2 воздействующую СШП-помеху (250 В) удалось ослабить в 87 раз.

Для интеграции МФ в корпус БПЛА необходимо выполнить их трассировку с учетом свободного места в корпусе БПЛА. С учетом этого МФ были «свернуты» в витки со слабой электромагнитной связью между ними ($3w$). Это позволило получить итоговые габариты печатной платы (ПП) МФ2 $78,5 \times 80$ мм (тогда как начальные составляли $1200 \times 4,1$ мм).

Прототип ПП МФ2 выполненный в ПО Altium Designer, представлен на рис. 9.

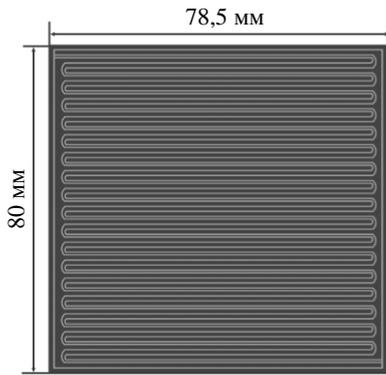


Рис. 9. Прототип ПП МФ2

Моделирование модальных фильтров на основе кабельных структур

Как отмечалось ранее, ряд кабельных / проводных соединений между РЭС БПЛА предлагается заменить на МФ с сохранением их рабочих характеристик. Так, в заводской сборке между полетным контроллером и GPS-модулем проложены четыре отдельных одножильных провода.

Рассмотрим вариант, когда 4 отдельных провода объединены в один 4-проводный экранированный МФ. Поперечное сечение такого МФ представлено на рис. 10. В результате оптимизации эвристическим поиском получены следующие параметры: $r_1 = 0,3$ мм; $r_2 = 3$ мм; $r_3 = 0,5$ мм; $r_4 = 0,53$ мм; $r_5 = 2$ мм; $r_6 = 1,8$ мм; $\epsilon_{r1} = 1$; $\epsilon_{r2} = 7$; $\epsilon_{r3} = 4,2$ [9].

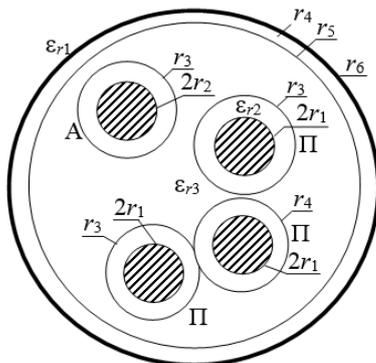


Рис. 10. Поперечное сечение 4-проводного МФ на основе кабельной структуры

Эквивалентная схема данного МФ представлена рис. 11. Длина МФ принята $l = 250$ мм, а значения R_r , R_n и R – по 50 Ом. Выбор длины обусловлен длиной исходных проводов. Параметры воздействующей СШП-помехи остались без изменений.

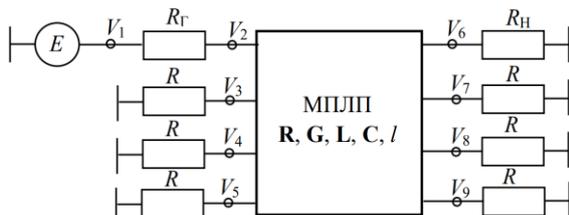


Рис. 11. Эквивалентная схема 4-проводного МФ на основе кабельных структур

Формы напряжений в МФ представлены на рис. 12.

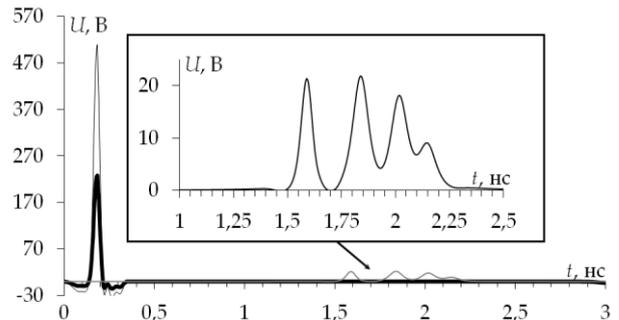


Рис. 12. Формы ЭДС (—), напряжения на входе (—) и выходе (—) 4-проводного МФ на основе кабельных структур

Из рис. 12 видно, что к выходу МФ приходят 4 основных импульса с максимальной амплитудой 21,87 В. При этом максимальное рабочее напряжение полетного контроллера составляет 22 В. В данном случае между 1-м и 2-м, а также 2-м и 3-м импульсами обеспечивается условие, при котором разница погонных задержек импульсов разложения больше длительности воздействующего импульса, а их частичное наложение объясняется влиянием потерь и дисперсией в линии передачи. В результате, удалось ослабить воздействующую СШП-помеху в 11,9 раза (по сравнению с входным напряжением 250 В).

Экранирование

Экранирующие корпуса широко применяются для защиты РЭС от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Способность корпуса обеспечивать защиту РЭС определяется значением его эффективности экранирования (ЭЭ), которая зависит от множества факторов: материала экрана, геометрических размеров экрана, его апертур и др. [10, 11]. В данной работе предполагается использовать металлические корпуса с апертурами для экранирования основных элементов РЭС в составе БПЛА. Расчеты выполнены в среде 3D SE BOX.

На рис. 13 представлена модель корпуса GPS модуля БПЛА роторного типа длиной 30 мм, шириной 30 мм и высотой 7 мм с апертурой для кабелей, которые подключаются к полетному контроллеру. Форма апертуры выбрана для возможности монтажа этих кабелей. Частотная зависимость ЭЭ приведена на рис. 14.

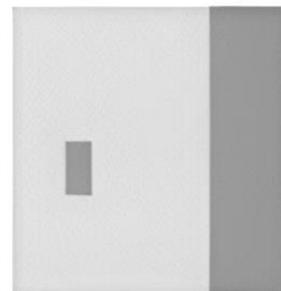


Рис. 13. Модель корпуса GPS-модуля с апертурой для подключения к полетному контроллеру

Как видно из представленного результата, ЭЭ корпуса с апертурой для разъема подключения

GPS-модуля к полетному контроллеру, затухает от 0 до 9,8 ГГц (от 420 до 350 дБ), а первая резонансная частота составляет 9,8 ГГц. Это связано с тем, что моделируемый корпус имеет малые габариты и апертуру.

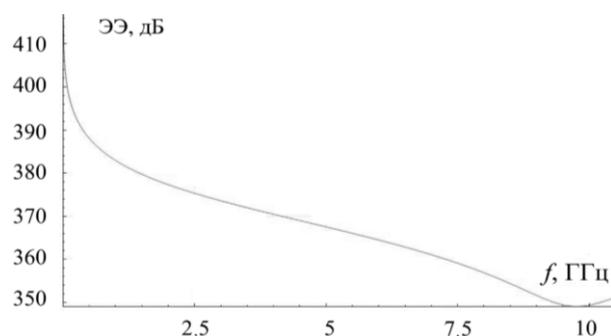


Рис. 14. Частотная зависимость ЭЭ экрана GPS-модуля

Оценка эффективности применения подходов к обеспечению ЭМС беспилотного летательного аппарата при воздействии СШП-помехи

Для обеспечения ЭМС в части защиты РЭС в составе БПЛА от воздействующей СШП-помехи, в качестве структуры с модальными явлениями использовались 2 различных МФ: на основе меандровой МПЛ с двумя отдельными витками и 4-проводной на основе кабельной структуры. МФ на основе меандровой МПЛ с двумя отдельными витками, включаемый между GPS модулем и антенной БПЛА, способен ослабить СШП-помеху (250 В) до 2,86 В при максимальном рабочем напряжении GPS-модуля LEA-6H 3,3 В. В результате коэффициент ослабления воздействующей СШП-помехи составил 87 раз.

Кроме этого, рассмотрен МФ на основе кабельных структур (предлагается полная замена проводов и кабелей, установленных в БПЛА роторного типа, на данные МФ). Данный МФ способен разложить воздействующую СШП-помеху на 4 моды с максимальным напряжением 21,87 В (с коэффициентом ослабления 11,9 раза).

Заключение

В работе рассмотрен БПЛА JMT F550 6-Aix. Составлена структурная схема РЭС в составе данного БПЛА и оценены пути распространения кондуктивных помех. Выполнено моделирование меандровой линии с двумя отдельными витками, модального фильтра на основе 4-проводной кабельной структуры, а также экранирующего корпуса для защиты критических элементов РЭС от воздействия мощной СШП-помехи. Выполнены анализ и оценка эффективности такой защиты. Результаты проделанной работы могут быть полезны для разработчиков БПЛА для поддержания удовлетворительной электромагнитной обстановки среди РЭС БПЛА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01331, <https://rscf.ru/project/22-29-01331/>.

Литература

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2020. – 204 с.

2. Методы противодействия БПЛА [Электронный ресурс]: сайт arsenal-otechestva.ru. – URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/1601-metody-protivodejstviya-bpla>. (дата обращения: 14.09.2023).

3. Белоусов А.О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 134–196. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-134-196.

4. DJI Phantom 3: обзор, характеристики, инструкция [Электронный ресурс]: сайт dronnew.ru. – URL: <https://dronnews.ru/obzory/dji/dji-phantom-3-standard.html> (дата обращения: 13.09.2023).

5. JMT F550 6-Aix: обзор, характеристики [Электронный ресурс]: сайт stelashop.ru. – URL: <https://stelashop.ru/product/32810864322> (дата обращения: 14.09.2023).

6. Gps with compass [Электронный ресурс]: сайт lyvi.ru. – URL: <https://lyvi.ru/p-4000016400431> (дата обращения: 14.09.2023).

7. Система TALGAT – программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]: сайт talgat.org – URL: <https://talgat.org/talgat-software/> (дата обращения: 15.09.2023).

8. Белоусов А.О. Анализ характеристик трёхпроводного модального фильтра в экстремальных условиях / А.О. Белоусов, В.О. Гордеева // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 64–82. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-64-82.

9. Belousov A.O. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses / A.O. Belousov, N.O. Vlasova, V.O. Gordeyeva, T.R. Gazizov // Symmetry. – 2022. – Vol. 14(6), No. 1228. – PP. 1–34. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/6/1228/pdf>. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14061228>.

10. Иванов А.А. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 16–23.

11. 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.

12. Белоусов А.О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2019. – 177 с.

Корнев Александр Евгеньевич

Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Эл. почта: kornev12333@mail.ru

Пономарев Всеволод Алексеевич

Студент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: Ponomarev.vsevolod.2001@mail.ru

Юнеман Марк Евгеньевич

Студент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: myuneman@bk.ru

Белоусов Антон Олегович

Доцент каф. ТУ ТУСУРа,
н.с. центра экспертизы и испытаний СахГУ, к.т.н.
Эл. почта: anton.belousov@tu.tusur.ru