

чиков относительно испытываемой аппаратуры. Предлагаемое расположение измерительных датчиков при измерении компоненты магнитного момента M_x приведено на рис. 5.

Для такой измерительной установки значения индукции $\vec{B}_1 \dots \vec{B}_4$ магнитного поля первой ($n = 1$) пространственной гармоники испытуемого объекта, которые измеряются каждым из датчиков 1–4, определяются соотношением

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \vec{B}_3 = \vec{B}_4 = \left(B_{r(\varphi=\frac{\pi}{4})} + B_{\varphi(\varphi=\frac{\pi}{4})} \right) \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{3M_x}{8\pi R^3}.$$

Величина суммарной измеренной индукции $B_{s(n=1)}$, как и в предыдущем случае, будет равна

$$B_s = B_{s(n=1)} = 4 \cdot \frac{3M_x}{8\pi R^3} = \frac{3}{2\pi R^3} M_x.$$

Анализ соотношений (1)–(3) показывает, что для предлагаемого расположения датчиков величина B_m будет определяться значениями индукции нечетных пространственных гармоник, начиная с пятой гармоники ($n = 5, 7, 9 \dots$).

Поэтому первой значащей гармоникой, вносящей вклад в погрешность B_m , будет пятая ($n = 5$) пространственная гармоника магнитного поля испытуемой аппаратуры. Следовательно, погрешность измерений уменьшается на величину, определяемую третьей пространственной гармоникой.

Таким образом, предлагаемое расположение измерительных датчиков позволяет обеспечить более высокие метрологические показатели при измерении магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

УДК 621.319.7.001

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОРПУСАМИ АВИАНИКИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В.В. Князев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”, г. Харьков

И.А. Постельник, младший научный сотрудник НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”, г. Харьков



В.В. Князев



И.А. Постельник

Представлен преобразователь напряженности электрического поля с оптической линией передачи информации для диапазона частот от 0,1 до 5 ГГц. Предложена методика использования этого преобразователя. Представлены результаты измерения эффективности экранирования реальным корпусом. Доказана высокая эффективность использования предложенной методики и преобразователя.

The transformer with the tension of the electric field with the optical transmission line for the range of frequen-

Выводы

Предложен улучшенный вариант измерительной установки, обеспечивающий повышение точности измерений магнитных моментов аппаратуры космического назначения.

Предлагаемый вариант измерительной установки может быть реализован с минимальными финансовыми затратами на базе существующих средств измерения индукции магнитного поля.

Список литературы

1. Нормирование и измерение собственного магнитного поля космических аппаратов / В. Розов, С. Петров, А. Ерисов, А. Меланченко // Космические технологии: настоящее и будущее: III Междунар. конф.: тез. докл. – Днепропетровск, 2011. – С. 45.
2. Kildishev A.V. Measurement of the spacecraft main magnetic parameters / A.V. Kildishev, S.A. Volokhov, J.D. Saltykov // AUTOTESTCON'97: Conference Proceedings. IEEE SYSTEMS READINESS TECHNOLOGY CONFERENCE, September 22–25, 1997, Anaheim, California. – P. 669–675.
3. Дудкин Ф.Л. Оценка требований к платформам микро- и наноспутников в контексте длительных измерений магнитного поля Земли / Ф.Л. Дудкин, Д.Ф. Дудкин // Космический проект “Ионосат-Микро” / под ред. С. А. Засухи, О. П. Федорова. – К.: Академперіодика, 2013. – С. 53–65.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т. 1 / Б.М. Яновский. – Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1964. – 445 с.
5. Электрооборудование силовое. Методы измерения параметров низкочастотного периодического магнитного поля: ГОСТ Р 50012.

cies from 0.1 GHz to 5 GHz is presented. The methods for using this transformer are proposed. The results of measuring of the shielding efficiency of the real casing are presented. The high efficiency of the offered measuring method is well-proven.

Введение

Определение уровня устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к различным электромагнитным явлениям осуществляется в соответствии с требованиями международного стандарта КТ-160D*. Раздел 20 этого стандарта регламентирует испытания устойчивости к действию высокоинтенсивного радиочастотного электромагнитного поля (HIRF) в диапазоне частот от 100 МГц до 18 ГГц. При этом нормируется уровень напряженности электрического поля в зависимости от частоты и категории оборудования. Для некоторых категорий оборудования напряженность электрического поля при импульсной модуляции достигает тысяч вольт на метр, например, для категории L в диапазоне частот от 4 до 6 ГГц напряженность установлена равной 7200 В/м. В настоящее время в Украине такие прямые испытания не представляются возможными. Поэтому для предварительной оценки уровня устойчивости стандарт КТ-160D допускает возможность проведения испытаний с пониженным уровнем напряженности поля с учетом экранирующих свойств корпусов оборудования. Это обстоятельство обуславливает актуальность разработки средств измерения напряженности электрического поля внутри корпусов-экранов и отработки соответствующих методик измерений.

Основная часть

Имеющееся в нашем институте испытательное оборудование позволяет исследовать эффективность экранирования корпуса в диапазоне частот от 100 МГц до 3 ГГц, которая определяется на основании результатов измерения напряженности E_0 воздействующего электрического поля и напряженности поля E_1 внутри корпуса в одной и той же точке пространства. Измеренные значения напряженности E [дБ·мкВ/м] рассчитываются по показаниям измерительного приемника (анализатора спектра) по формуле

$$E = U_{\text{ин}} + K_a, \quad (1)$$

где K_a — коэффициент калибровки измерительной антенны, дБ; $U_{\text{ин}}$ — показания измерительного приемника, дБ.

Эффективность экранирования корпуса блока по электрическому полю определяется формулой

$$B = 20 \lg(E_0 / E_1). \quad (2)$$

Для снижения погрешности результатов измерений применен метод измерения одной антенной. В этом случае результат экспериментального определения значения B , с учетом формул (1) и (2), не зависит от K_a — коэффициента калибровки измерительной антенны (в предположении, что значение K_a не зависит от напряженности измеряемого электрического поля в диапазоне измерения). Следовательно, эффективность экранирования корпуса блока по электрическому полю B [дБ] определяется формулой

$$B = U_{\text{ин}}(0) - U_{\text{ин}}(i),$$

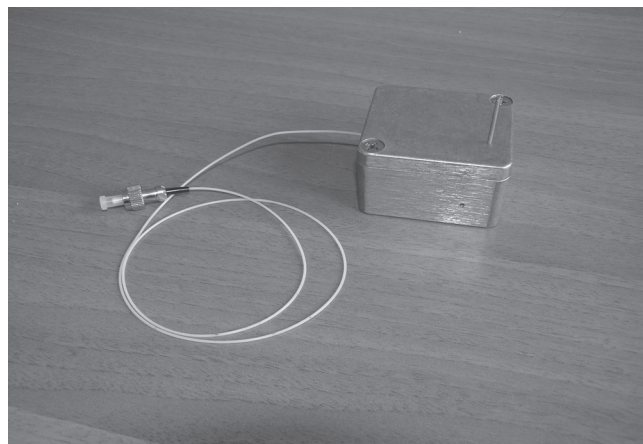
где $U_{\text{ин}}(0)$ — показания измерительного приемника при измерении напряженности воздействующего E_0 поля, дБмкВ; $U_{\text{ин}}(i)$ — показания измерительного приемника при измерении напряженности E_1 поля внутри корпуса, дБмкВ.

При исследованиях измерительный преобразователь ЕПО-1 (габаритные размеры $45 \times 40 \times 30$ мм³), представленный на рис. 1а, размещался внутри корпуса блока. Преобразователь крепился к стенке корпуса на двусторонний скотч. ЕПО-1 осуществляет передачу информации по световоду, что обеспечивает полную гальваническую развязку с пространством вне корпуса. Исследования показали, что использование датчиков Е-поля с кабельной линией связи приводит к ошибочному (заниженному) результату оценки экранирующих свойств корпуса, особенно на его резонансных частотах. Прохождение световода через переднюю панель корпуса осуществлено с использованием оптических разъемов, как показано на рис. 1б. После установки ЕПО-1 в заданную точку крепилась панель корпуса в соответствии с конструкторской документацией. Винты были закручены до упора. Усилие при закручивании винтов не контролировалось. При измерениях напряженности внешнего E_0 -поля и E_1 -поля внутри корпуса использовался один и тот же преобразователь ЕПО-1, что обеспечило возможность исключить калибровочные коэффициенты преобразователя. Очевидно, что минимальными защитными свойствами корпус-экран обладает на собственных резонансных частотах. Поэтому при сканировании диапазона резонансные частоты просматриваются обязательно.

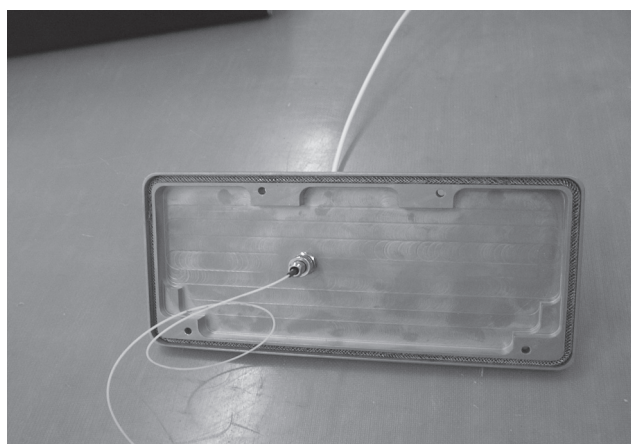
Размеры исследуемого корпуса $320 \times 88 \times 190$ мм. Соответственно, первые четыре резонансные частоты таковы (в ГГц): 0,917; 1,225; 1,612; 1,640. В качестве примера на рис. 2 представлена расчетная структура распределения модуля электрического поля в пространстве корпуса для первой резонансной частоты.

Первоначально проведено измерение напряженности электрического поля (вертикальная со-

* Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 20.0 Радиочастотная восприимчивость (радиоизлучение и проводимость). — АРМАК, 2004.



а



б

Рис. 1. Измерительный преобразователь ЕПО-1 – а; прохождение световода через панель корпуса – б

ставляющая при вертикальной поляризации излучающей антенны) в месте последующего расположения корпуса. Пройден частотный диапазон от 100 МГц до 3 ГГц. Особый интерес представляет диапазон резонансных частот. В диапазоне от 0,8 до 3 ГГц напряжение с генератора Agilent N9310A через усилитель мощности ВВА150-D60 подавалось на логопериодическую излучающую антенну СВL-6143А. При уровне напряжения 50 В напряженность создаваемого электрического поля в месте расположения датчика достигала значения 112 дБ/мкВ. Затем преобразователь ЕПО-1 размещался внутри корпуса в его геометрическом центре, в том же самом месте, что и в предыдущих измерениях (отличие значений координат не превышало ± 5 мм).

Экспериментальные исследования проведены для трех взаимно ортогональных положений корпуса по отношению к вектору напряженности воздействующего электрического поля. Во всем частотном диапазоне до первой резонансной частоты не было зафиксировано значений, превышающих уровень фона датчика ЕПО-1 (уровень фона при использовании анализатора спектра FSL3 составлял 50 дБ/мкВ).

Для проверки работоспособности системы измерений были ослаблены винты крепления перед-

ней панели корпуса. При этом сигнал на первой резонансной частоте 917,5 МГц составил 76 дБ/мкВ, следовательно, эффективность экранирования – 36 дБ. Исследования проведены и на других резонансных частотах при установке датчика в места ожидаемых максимумов. Были получены аналогичные результаты.

Вследствие этого можно утверждать, что эффективность экранирования исследуемого корпуса в том варианте, который был представлен на испытаниях, при условии максимального прижатия панелей к боковым стенкам корпуса превышает 60 дБ (то есть ослабление более чем в 1000 раз).

В соответствии с рекомендациями КТ-160Д и в предположении возможного ослабления силы прижатия между элементами корпуса в процессе эксплуатации, эффективность экранирования была принята равной 36 дБ, что соответствует коэффициенту ослабления в 63 раза. Этот коэффициент принят для диапазона частот от

Уровни напряженности
воздействующего электрического поля
с учетом экранирующих свойств корпуса

Диапазон частот, ГГц	0,1...0,7	0,7...1,0	1,0...2,0	2,0...3,0
Норма, В/м	220	220	630	950
Ослабление, раз	63	63	63	63
Расчетное значение, В/м	3,5	3,5	10,0	15,1
Испытательный уровень, В/м	10,0	10,0	10,0	16,0

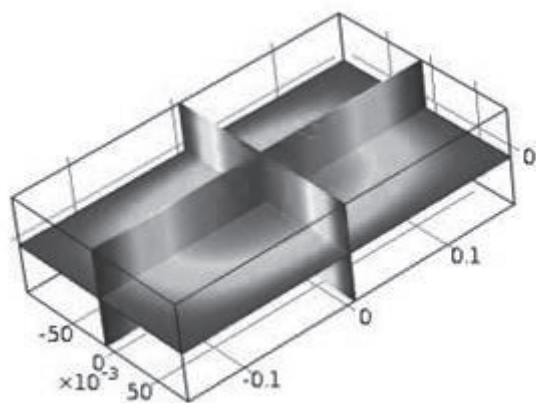


Рис. 2. Распределение напряженности модуля E -поля внутри корпуса на первой резонансной частоте (максимальное значение в геометрическом центре корпуса)

Примечание. Электромагнитное поле монохроматическое с импульсной модуляцией: ширина импульса – не менее 4 мкс, частота повторения – 1 кГц, глубина – не менее 90 %.

100 МГц до 3 ГГц. Соответствующие испытательные уровни представлены в таблице.

Далее испытания устойчивости образца оборудования были проведены путем воздействия электромагнитного поля с уровнями, указанными в таблице, при снятом корпусе. Оборудование сохранило качество функционирования по категории А. Следовательно, экранирующие свойства корпуса блока таковы, что обеспечивается надежная защита электронной части блока от дестабилизирующего действия высокоинтенсивного радиочастотного поля в частотном диапазоне от 0,1 до 3 ГГц

УДК 621.396.969.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ В СОСТАВЕ МАКЕТА ГЕОРАДАРА ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

- А.В. Букин**, младший научный сотрудник Института радиопизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков
- Е.М. Васильева**, кандидат технических наук, начальник лаборатории ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков
- В.Г. Сузак**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории Института радиопизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков



А.В. Букин

Е.М. Васильева

В.Г. Сузак

Разработана широкополосная антенна для подповерхностного зондирования, позволяющая излучать и принимать сигналы ортогональных поляризаций. Изготовлен и испытан стенд для исследования технических характеристик макета георадара.

Developed is the broadband antenna for subsurface sensing, allowing to modify the polarization of the emitted (received) signals. Manufactured and tested the stand for research of the technical characteristics of the layout of the GPR.

Введение

Под подповерхностной радиолокацией понимается радиолокационное зондирование радиопрозрачных сред с целью обнаружения объектов, скрытых в этих средах. В настоящее время неразрушающий контроль дорог, тротуа-

при заданных в стандарте уровнях напряженности электрического поля.

Выводы

Разработан малогабаритный преобразователь напряженности электрического поля с оптической линией передачи информации в диапазоне частот от 0,1 до 5 ГГц.

Проведены измерения эффективности экранирования реального корпуса – экрана.

Доказана высокая эффективность предложенного метода измерений.

ров, бетонных сооружений, поиск находящихся под землей объектов (труб, пустот и т. п.) вызывает все возрастающий интерес. Появление сверхвысокочастотных твердотельных радиоэлементов, развитие компьютерной техники и прикладного программного обеспечения дали возможность создавать малогабаритные радиолокаторы для подповерхностного зондирования (георадары). В англоязычной научно-технической литературе они называются "Ground Penetrating Radar" или "GPR".

Принципы, лежащие в основе работы георадара, имеют много общего с классическим радиолокатором, однако определенные физические свойства сред (например, диэлектрическая проницаемость, проводимость, слоистость), в которых производится радиолокационное зондирование, накладывают ограничения на его применение. Большинство вышеперечисленных свойств среды являются заранее неизвестными, поэтому точное определение местоположения исследуемых объектов является сложной задачей.

Распространение радиоволн в среде в значительной степени определяется ее физическими свойствами. Среда может быть однослойной и многослойной, содержать разнообразные включения, такие как песок, вода, дерево, асфальт, металлические конструкции и т. п. Для описания физических свойств среды применяются понятия: скорость распространения электромагнитной волны в среде,